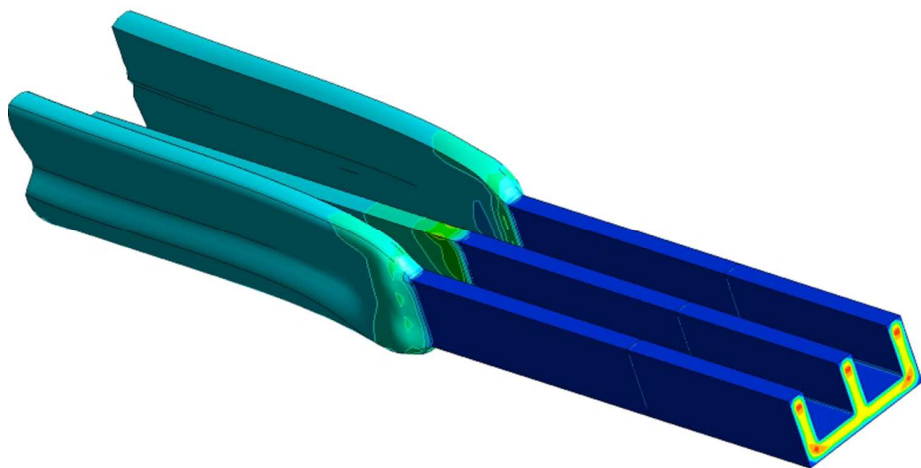


*К. Г. Коваленко
О. Л. Сокольський
В. І. Сівецький*

**ЕКСТРУЗІЙНЕ ФОРМУВАННЯ
ПОЛІМЕРНИХ ПОГОНАЖНИХ
ВИРОБІВ З УРАХУВАННЯМ
В'ЯЗКОПРУЖНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ**



*К. Г. Коваленко
О. Л. Сокольський
В. І. Сівецький*

**ЕКСТРУЗІЙНЕ ФОРМУВАННЯ
ПОЛІМЕРНИХ ПОГОНАЖНИХ
ВИРОБІВ З УРАХУВАННЯМ
В'ЯЗКОПРУЖНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ**

Монографія

Київ
НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського»
2018

УДК 678.027.3(043.3)
ББК 35.71
И25

*Рекомендовано до друку Вченою радою
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
(Протокол № _ від _ грудня 2018 р.)*

Рецензенти: *О. М. Гавва*, д-р техн. наук, проф.,
Національний університет харчових технологій

І. І Назаренко, д-р техн. наук, проф.,
Київський національний університет будівництва та архітектури

Коваленко К. Г.

И25 Екструзійне формування полімерних погонажних виробів з урахуванням в'язкопружних властивостей [Текст] : монографія / К. Г. Коваленко, О. Л. Сокольський, В. І. Сівецький. – К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – 108 с.: іл. –
Бібліогр.: с. 97–105. – 300 прим.

ISBN 000-000-000-000-0

У монографії розглянуто підходи до визначення, моделювання та технологічні рекомендації конструктивного профілювання формуючих каналів при вільному екструзійному формуванні, які забезпечують виготовлення полімерного профілю заданого поперечного перерізу, що дозволяє відмовитися від складних калібрувальних пристроїв.

Проведено експериментальні дослідження реологічних параметрів матеріалу і характеру ефекту розбухання полімерного матеріалу після його виходу з формуючого інструменту.

Запропоновано конструктивні засоби для поліпшення якості полімерних погонажних профільних виробів і скорочення часу розробки та оптимізації параметрів процесу екструзії, що приводить до зниження матеріальних витрат, підвищення якості продукції і продуктивності.

Для фахівців полімерного машинобудування та споріднених галузей виробництва, а також викладачів, аспірантів і студентів інженерно-хімічних спеціальностей вищих навчальних закладів.

**УДК 678.027.3(043.3)
ББК 35.71**

ISBN 000-000-000-000-0

© К. Г. Коваленко,
О. Л. Сокольський,
В. І. Сівецький, 2018

АНОТАЦІЯ

У монографії розглядається вплив в'язкопружних властивостей полімерних матеріалів на процеси екструзійного формування полімерних погонажних профільних виробів у каналах переробного обладнання та на виході з них.

Проведений аналітичний аналіз сучасного стану дослідження потоку полімеру показав недостатню дослідженість особливостей течії в'язкопружних рідин, зокрема, ефекту розбухання в зонах виходу з формуючих каналів більш складного перетину, ніж круглого або прямокутного і відсутність методів профілювання формуючих каналів для компенсації ефекту розбухання. Існуючі в'язкопружні реологічні моделі і методики обліку при розрахунку умов проковзування і в'язкопружних властивостей течії розплаву полімеру в формуючих каналах інструменту мають необхідну доцільність використання найбільш реалістичної і якісної реологічної моделі, яка враховує явище розбухання

Обґрунтовано доцільність використання реологічної моделі Фан-Тьєн-Таннера (ФТТ) для моделювання в'язкопружної течії в профільних екструзійних головках, оскільки вона дозволяє реалістично оцінити в'язкопружну поведінку розплаву полімеру на виході з формуючого інструменту екструдера, врахувати ефекти розбухання полімерного матеріалу, полегшує числове моделювання процесу екструзійного формування погонажних виробів. Це дозволяє більш точно врахувати зміну перерізу екструдованих погонажних профілів на виході з формуючого інструменту.

Розроблена методика експериментальних досліджень реологічних параметрів полімерного матеріалу і його розбухання після виходу з формуючого інструменту.

Експериментально визначені реологічні параметри, які дозволяють точніше здійснювати розрахунок параметрів процесу течії в'язкопружної рідини у формуючому каналі та враховувати ефекти розбухання розплаву полімеру в зоні вільної поверхні при виході з формуючого інструменту, що дозволяє прогнозувати неоднорідність і властивості полімерних виробів.

Наведено результати експериментальних та числових досліджень і методику уточненого проектування геометрії формуючих каналів для виробництва різноманітних погонажних профільних виробів. Вона включає стадії попереднього моделювання процесу вільної екструзії та реалізацію алгоритму проектування формуючих каналів головки методом вирішення оберненої задачі профілювання.

Установлена кореляція між числовими та натурними експериментами підтверджує адекватність розробленої аналітичної моделі та створеного гідродинамічного моделювання кінцево-елементної моделі, на якій проводилися числові експерименти.

Результати числових досліджень показують, що в разі виконання формуючих каналів з геометрією, яка відповідає заданому перерізу екструдованих профілів, дійсний переріз може значно відрізнятись від цільового. Запропоноване врахування в'язкопружних властивостей рідини при моделюванні течії з використанням моделі ФТТ дозволяє визначити межі області перебудови екструдованого профілю і здійснювати обґрунтований вибір параметрів формуючого інструменту.

При екструзії профілю крізь формуючий канал з рекомендованою довжиною вихідного формуючого каналу забезпечуються релаксації напружень та мінімізація

ефекту розбухання. При цьому довжина каналу, а отже і гідравлічний опір є досить великими. Зі зменшенням довжини формуючих каналів явище розбухання стає більш значним – форма екструдату спотворюється. Врахування умов в'язкопружних властивостей екструдату при вирішенні оберненої задачі екструзії профільних виробів дозволяє зменшити довжину формуючих каналів за рахунок корегування його конфігурації. Це дозволить зменшити перепад тиску в головці на 10-12 %, а відповідно енергетичні витрати на процес формування профільних погонажних виробів.

Розв'язок оберненої задачі полягає у визначенні необхідної форми каналу головки для забезпечення умови отримання виробу заданої геометрії. Моделювання на першому етапі проводиться без урахування можливості компенсації розбухання екструдату і інших ефектів. Результати такого ітераційного моделювання демонструють особливості течії полімеру і визначення області з уповільненим рухом полімерного матеріалу, що може призвести до спотворення форми екструдованого виробу або ж до його локального розкладання.

На підставі результатів, отриманих при попередньому моделюванні, наступним кроком є реалізація алгоритму Флетчера-Рівса, який застосовано для визначення геометрії формуючого каналу головки з метою забезпечення бажаної форми екструдованого профілю.

Прогнозування геометрії останньої ділянки формуючого каналу дало можливість отримати варіант оптимізованої геометрії вихідної області формуючого каналу головки для формування заданої геометрії виробу.

Обчислювальна потужність програмного гідродинамічного моделювання дозволяє здійснювати також прогнозування геометрії не лише у формуючому каналі, а і в предканалі, тобто для формуючих головок з більш складною геометрією. Оскільки будь-який процес моделювання коротший і менш дорогий ніж метод проб і помилок при виготовленні головок, це дає можливість підвищити ефективність їх проектування і виробництва в цілому.

Методика поєднує наближену аналітичну і уточнену скінченно-елементну моделі, що дозволяє здійснювати проектний розрахунок конфігурації формуючих каналів екструзійних головок для формування виробів з полімерних матеріалів з урахуванням їх реологічних властивостей. Використання розробленої моделі дозволяє коригувати технологічні режими і конфігурацію каналів в числових експериментах, досягаючи рівномірності витрати розплаву і оптимізуючи інші задані параметри.

Розроблено методику та технологічні рекомендації конструктивного профілювання формуючих каналів при вільному екструзійному формуванні, які забезпечують виготовлення полімерного профілю заданого перерізу, що дозволяє позбутися необхідності використання калібруючих пристроїв.

Розроблена методика моделювання процесу вільної екструзії дозволила реалізувати алгоритм проектування формуючих каналів головки методом вирішення оберненої задачі профілювання, що дало можливість за умови відомих параметрів одержуваного екструзією виробу проектувати необхідну конфігурацію фільтри екструзійної головки, проводити уточнення геометрії формуючого каналу головки і отримання екструдованого профілю заданої форми, а також дозволило

знизити енергетичні витрати до 10 % чи збільшити продуктивність процесу формування до 14 %.

Результат співставлення натурного експерименту і числового моделювання оберненої задачі екструзії полімерного профілю для обчислення необхідної геометрії вихідної ділянки формуючого каналу головки підтверджує можливість і доцільність використання даної методики для досягнення заданих параметрів геометрії цільового профілю.

Побудована за розробленою методикою геометрія формуючих каналів головки дозволяє зменшити розбухання екструдату на виході з 14 – 18 % до 9 %.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ І СКОРОЧЕНЬ

k – коефіцієнт тертя;
 L – довжина каналу, мм;
 n – індекс течії;
 P – тиск, Па;
 Q – об'ємна витрата, мм³/с;
 T – температура, °С;
 $\dot{\gamma}$ – швидкість зсуву, с⁻¹;
 v – швидкість, м/с;
 ρ – густина, кг/м³;
 τ_1 – в'язкопружна компонента;
 τ_2 – пружна компонента;
 λ_t – час релаксації для розплаву, с;
 τ^∇ – верхня конвективна похідна;
 τ^Δ – нижня конвективна похідна;
 η – постійна зсувна в'язкість, Па·с;
 η_1 – динамічна в'язкість, Па·с;
 η_2 – об'ємна в'язкість, Па·с;
 η_e – неньютонівський вклад в загальну в'язкість, Па·с;
 ξ – матеріальний параметр, який контролює зсувну в'язкість;
 ε – матеріальний параметр, який контролює розширювальну здатність розплаву;
 \dot{D} – швидкість зміни тензора деформації, с⁻¹;
 ∇ – оператор Гамільтона, м⁻¹;
 F_{slip} – коефіцієнт ковзання (тертя) на поверхні каналу, кг/(м²·с);
 e_{slip} – параметр матеріалу;
 De – число Дебори;
 We – число Вайссенберга.
Основні скорочення:
ПАТ – публічне акціонерне товариство (при назві установи);
НВП – науково-виробниче підприємство (при назві установи);
ТОВ – товариство з обмеженою відповідальністю;
НТУУ КПІ ім. Ігоря Сікорського – Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"
ПЕНТ – поліетилен низького тиску;
ПВХ – полівінілхлорид;
ПЕВТ – поліетилен високого тиску;
ПС – полістирол;
ФТТ – Фан-Тьен-Таннер;
ФР – Флетчер-Рівс.

ВСТУП

Для забезпечення внутрішнього ринку України імпорт профільних погонажних виробів перевищив 50 %. У багатьох галузях промисловості, будівництва та народного господарства широко використовуються різноманітні профільні погонажні полімерні вироби, які зокрема виготовляють методом вільної екструзії. В даному процесі гомогенізований розплав полімеру нагнітається через екструзійну головку, в якій відбувається формування бажаної конфігурації погонажних виробів без взаємодії з калібрувальним інструментом і додаткової механічної обробки.

Внаслідок в'язкопружних властивостей розплавів полімерів при їх вільній екструзії спостерігаються такі негативні явища, як спотворення конфігурації екструдованих виробів, то це необхідно враховувати при розробці технології та конструкції формуючого інструменту. В той же час конфігурація полімерних виробів урізноманітнюється, а процес проектування геометрії і формуючих каналів ускладнюється також за рахунок того, що розплави полімерів, з яких формують вироби, змінюють свої в'язкопружні властивості як в процесі підготовки в екструдері, так і під час течії у каналах формуючого інструменту та на виході з них. Це ускладнює моделювання процесів вільного екструзійного формування.

Багатьма авторами інтенсивно досліджуються течії реологічно складних середовищ в різних каналах. Конфігурації формуючих каналів та полімерних виробів ускладнюються, а рецептура композицій, з яких формують полімерні вироби, постійно змінюються, що також ускладнює моделювання цих процесів, особливо за наявності вільних та контактуючих поверхонь на виході каналів.

В силу складності і великого обсягу розрахунків при моделюванні процесів формування виробів складної геометрії, такі розрахунки нині виконуються за допомогою обчислюваної техніки та унікального програмного забезпечення на математичній базі методів скінченних елементів й контрольних об'ємів. Такі програмні продукти визначають пріоритет розробника в певній галузі і мають значну наукову та комерційну цінність.

При переробці полімерів спостерігається цілий ряд реологічних явищ, зокрема таких як пам'ять накопичених деформацій і ефекти розбухання екструдату, зумовлених характерною для кожного з них наявністю певного часу релаксації напружень. Тому при числовому моделюванні процесів вільного екструзійного формування погонажних полімерних виробів потрібно враховувати вказані ефекти в'язкопружної поведінки полімерів, пов'язану з їх здатністю запасати пружну енергію, яка частково може бути "повернута розплавом" при зміні умов деформування та в наслідок його високоеластичності. Зокрема, окрім таких реологічних характеристик полімерів, як зсувна в'язкість, яка є функцією швидкості зсуву, необхідно враховувати повздовжню в'язкість, і вплив нормальних напружень на поведінку екструдованого розплаву полімеру в області збіжної течії з формуючого отвору екструзійної головки [1].

Незважаючи на виняткову важливість проблеми, кількість публікацій по результатах досліджень поведінки розплавів полімерів в області збіжних потоків, впливу на них в'язкопружних властивостей полімерів, конфігурації формуючих

каналів складної геометричної форми і процесів, що відбуваються безпосередньо на виході з них на зміну конфігурації екструдованих профілів, недостатня. Піонерськими публікаціями результатів досліджень збіжних потоків можна вважати роботи Спенсера і Діллона [2], Беглі і Шрайбера [3] і Торделла [4] про механізми руйнування розплаву, Хана і Дрекслера [5] про механізм руйнування розплаву при витіканні з каналу і про вплив нормальних напружень, Хана і Кіма [6] з оцінки впливу в'язкості розплаву на перепад тиску, тощо.

У роботах Фан-Тьена, Таннера, Мітсуліса, Хассагера [7-10] було запропоновано декілька математичних моделей опису течії збіжних потоків для каналів простої конфігурації. Показана необхідність вибору тієї чи іншої реологічної моделі в залежності від розгалуженості молекулярної структури полімеру, швидкості зсуву, наявності ефекту ковзання розплаву по стінах каналів, тощо. Аналогічні дослідження для каналів складного перетину розглядалися також роботи [45-50].

Профільні полімерні погонажні вироби різноманітного перерізу набули надзвичайно широкого розповсюдження в будівництві та інших галузях промисловості й народного господарства. Виробництво багатьох типів таких полімерних виробів здійснюється на базі процесу вільного екструзійного формування, при якому гомогенізована в екструдері полімерна композиція нагнітається крізь головку для створення бажаної конфігурації поперечного перерізу заданого погонажного виробу без взаємодії з калібрувальним інструментом. Внаслідок в'язкопружних властивостей розплавів полімерів при їх витіканні з формуючого каналу головки проявляються ефекти спотворення конфігурації екструдованих профілів відносно геометрії формуючого каналу. Тому при проектуванні формуючих головок для виробництва профільних погонажних полімерних виробів необхідно враховувати закономірності розподілу швидкостей течії в каналах головки і на виході з неї та прояву в'язкопружних властивостей розплавів полімерів, наявності ефектів їх проковзування по стінках формуючих каналів головки, тощо.

Проектування екструзійних головок для отримання екструдованих полімерних профілів є складним завданням, оскільки остаточний розмір профілю екструдату залежить не тільки від геометрії формуючих каналів головок, але і від властивостей пластмас та технологічних параметрів процесу екструзії.

При проектуванні екструзійної головки виникає два основних питання, які необхідно вирішити: як, по можливості, зробити потік рівномірно розподіленим і як передбачити постекструзійні ефекти. До цього часу метод спроб і помилок був основним при розробці конструкції екструзійних головок, так як була відсутня методика, яка б враховувала всі вказані закономірності характерні для процесу вільної екструзії полімерів й особливо супроводжуючі його постекструзійні ефекти в області збіжних потоків. Тому актуальним є розробка і застосування методики розрахунку екструзійних головок, яка б враховувала всі особливості процесів екструзійної течії полімерів у формуючих каналах та прояву постекструзійних ефектів внаслідок характерних для них в'язкопружних властивостей. Це необхідно для вирішення проблеми неоднорідності як форми поверхні так і стабільності конфігурації екструдованих виробів шляхом розробки методик й оптимізації

геометрії формуючого інструмента. При цьому значну роль відіграє числовий експеримент [11, 12, 13], який дозволяє в короткий термін і з мінімальними матеріальними витратами виконати оцінку впливу конструктивних й технологічних параметрів та реологічних властивостей полімерних матеріалів на якість екструдованих полімерних профільних погонажних виробів.

В даній роботі відображені деякі результати досліджень процесу та обладнання вільного екструзійного формування погонажних виробів з полімерного розплаву з урахуванням його в'язкопружних властивостей та вирішення проблеми спотворення перерізу погонажних профільних виробів шляхом оптимізації геометрії формуючого інструмента.

1 СТАН ПРОБЛЕМИ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЕКСТРУЗІЇ З УРАХУВАННЯМ В'ЯЗКОПРУЖНИХ ЕФЕКТІВ

1.1 Дослідження в'язкопружних властивостей течії розплавів термопластів та розбухання екструдату при його витіканні з формуючих каналів устаткування для виробництва профільних погонажних виробів

Для розплавів термопластів характерно не тільки в'язка, але і пружна поведінка (в'язкопружність). Цей тип поведінки характерний при течії полімерного розплаву в каналах екструзійної головки змінного поперечного перерізу каналу, в результаті чого виникає перепад тиску. Це відбувається внаслідок деформування розплаву в переходах між ділянками з різними поперечними перерізами каналу. Частину повної деформації при цьому складають пружні деформації. На виході з екструзійної головки пружні деформації проявляються у вигляді зміни форми і розмірів потоку, так зване «розбуханням» екструдату. Це зумовлено тим, що вивільняється енергія пружних деформацій, утворена в результаті зсувної деформації в каналах черв'ячних екструдерів та голови [15].

Здатність до оборотної деформації є наслідком, так званої, ентропійної пружності полімерних розплавів. Це означає, що макромолекули, які спочатку хаотично переплутані, можуть у процесі деформування значною мірою орієнтуватися в напрямку деформації. Однак як тільки це відбувається, орієнтована мережа прагне повернутися назад у стан максимально можливого безладу (на підставі другого закону термодинаміки). При течії в робочих каналах екструдера матеріал пристосовується до певного деформованого стану, проте поступово відбувається перегрупування макромолекул (так звана релаксація). Оскільки процес зниження орієнтованості макромолекул протікає повільно, він не завершується до моменту виходу матеріалу з екструзійної головки. У результаті процес релаксації продовжується і після виходу матеріалу з головки. Час, необхідний для завершення релаксації матеріалу з орієнтованого стану, скорочується із зростанням температури, оскільки в цьому випадку підвищується рухливість молекул. [15]

Відзначено, що розплав «запам'ятовує» деформований стан, якому він піддавався при проходженні через екструзійну головку. Це явище «ефекту пам'яті», характерно для в'язкопружних рідин, якими є розплави полімерів. Ці ефекти доставляють немало клопоту конструкторам і технологам при конструюванні технологічного оснащення та при відпрацюванні технологічного процесу виробництва виробів, особливо складної форми. Особливості течії конкретного полімерного матеріалу в каналах головки визначають, наскільки збільшаться розміри екструдату на виході з неї в результаті розбухання і як це відбивається на розмірах виробу, на ступені орієнтації матеріалу у виробі, а отже, і на його якості.

Однією з основних задач розрахунку екструзійних головок завжди вважалося визначення її гідравлічного опору, від якого залежать необхідний тиск, що розвивається шнеком екструдера на вході в головку, і відповідно продуктивність процесу. При цьому розплав полімерних матеріалів розглядають як в'язку ньютонівську або неньютонівську (наприклад, псевдопластичну) рідину, а його

пружними властивостями зазвичай нехтують [15]. Для такого розрахунку необхідно знати розміри всіх каналів головки і насамперед розміри кінцевої частини головки (фільтри), так як саме в ній спостерігається максимальне падіння тиску. При подібному підході розміри формуючого каналу задаються, як правило, за рекомендаціями, за аналогією або, в крайньому випадку, «на око».

На даний час у вітчизняній практиці при конструюванні екструзійних головок, як правило, не враховують пружні властивості розплаву, тобто здатність розплаву запасати в результаті деформування пружну енергію (так званий «ефект пам'яті»). Метод проб і помилок був основним при проектуванні екструзійних головок. Визначення конструктивних параметрів головок для нового виробу здійснювалось на основі попереднього досвіду і експериментів. Сучасний стан обчислюваної техніки дозволяє в багатьох випадках замінити дорогі експерименти та внутрішньозаводські випробування числовим моделюванням. Це дає можливість встановлення таких важливих параметрів процесу екструзії, як розподіл швидкості течії полімеру в формуючих каналах головки, напружень, тиску і температури перероблюваного полімеру, що неможливо визначити експериментально і тим самим забезпечити умови обґрунтованого визначення конструктивних та технологічних параметрів процесів формування погонажних виробів.

В роботі [16] показано, що пружні властивості призводять до виникнення побічних ефектів, які необхідно враховувати при конструюванні головок. До їх числа належать: зміна тиску на вході в канали при зміні поперечного перерізу; циркуляційні течії на вході; розбухання екструдату на виході з каналу, внаслідок якого поперечні перерізи екструдату і каналу екструзійної головки розрізняються; зміна діаметру, зменшення довжини і збільшення товщини стінок трубчастої заготовки при екструзії з роздуванням, тощо.

Нехтування пружністю розплаву може призводити до відносно великих помилок зокрема при розрахунку втрат тиску. У роботі [16] справедливості цього твердження показана на прикладі течії високомолекулярного ПЕВП через видувну екструзійну головку.

Як показує практика, розрахункові значення падіння тиску завжди нижче вимірних, і ця помилка зростає з ростом тиску в головці. Ця помилка виникає внаслідок зневаги в розрахунковій моделі в'язкопружними ефектами.

До складу екструзійних головок завжди входить фільтр, яка зазвичай має ділянку з постійними розмірами поперечного перерізу. Довжина цієї ділянки вибирається з метою «заспокоєння» розплаву і забезпечення релаксацій накопичених при течії напружень і оборотних деформацій.

Період релаксації залежить від передісторії течії, температури і не є постійною величиною. Для опису поведінки в'язкопружних рідин використовують поняття «характерного часу релаксації», що представляє собою час протягом якого початкова напруження (або оборотна деформація) знижується до умовно-рівноважного стану, відповідного певній швидкості зсуву і температурі [17]. Вважають, що при рівноважній деформації течія має чисто зсувний характер.

Якщо характерний час релаксації більше часу течії розплаву у формуючому каналі, то стаціонарний стан не досягається і релаксація триває на виході з каналу і проявляється, наприклад, у розбуханні екструдату. Усунути повністю розбухання

екструдату неможливо навіть при течії в дуже «довгих» каналах, так як запасена пружна енергія в розплаві не єдина причина розбухання. Перебудова профілю швидкостей від параболічного в каналі до плоского на виході з головки також вносить свій внесок у збільшення поперечного перерізу потоку, хоча внесок цього явища в розбухання не перевищує 10-20 % [17]. В даний час відзначається значний інтерес до проблем вирішення завдань, пов'язаних зі збіжними течіями. Ці течії одержали велике прикладне значення в різних галузях науки і технології.

В першу чергу до них відносяться проблема вільної екструзії при переробці полімерних матеріалів при виробництві профільних погонажних виробів, при якому виріб, що вийшов з формуючої головки, більше не контактує з калібрувальним інструментом і не піддається додатковій витяжці і механічній обробці. У цьому випадку остаточні розміри і форма виробу залежать від ефекту розбухання (званого іноді Барус-ефектом).

Панов [17] досліджував неоднорідність розбухання екструдату при виході з формуючого інструменту. В ході експериментів він встановив, що на величину коефіцієнта розбухання екструдатів впливають молекулярні характеристики, технологічні умови, фізичні властивості матеріалу, а також геометричні параметри формуючих каналів. Коефіцієнт розбухання швидко зменшується при зростанні відносної довжини каналів. Така закономірність розбухання струменя полімерів вказує на те, що вискоеластичні властивості розплавів при постійній деформації зсуву залежать від часу перебування матеріалу в каналі. Зменшення розбухання екструдованого струменя на виході з каналів при збільшенні їх відносної довжини пояснюється і тим, що розплави полімерів володіють так званою "пам'яттю" [19]. Панов зробив висновок також про те, що коефіцієнти розбухання екструдатів, отримані при витіканні розплавів з каналів складного поперечного перерізу, більші, ніж коефіцієнт розбухання екструдатів, отриманих в циліндричних каналах. Крім того, коефіцієнти розбухання екструдатів більше в тих випадках, коли у поперечного перерізу каналу, в якому вони були отримані, були виступаючі кути. При напірній течії розплаву полімеру виникають концентрації напруження і при виході потоку розплаву вони збільшують поперечне розбухання екструдату так, що нерівномірність напружень по перерізу в цілому для некруглого екструдату більше, ніж для потоку циліндричної форми.

Таннер [18] показав, що явище екструзійного розбухання може бути обумовлене двома факторами. Перший полягає в прояві пружних властивостей рідини. Другий - це перебудова профілю швидкостей при переході рідини з режиму течії Пуазейля до течії з вільною поверхнею.

Хан [19] вважає, що розбухання екструдату обумовлено релаксацією осьових нормальних напруження на виході з капіляра, тоді як інші дослідники вважають, що ефект розбухання визначається радіальними нормальними напруженнями. Автори [20-23] дотримуються думки, що розбухання екструдату на виході з капіляра характерно для неньютонівських в'язкопружних рідин і обумовлено вискоеластичними властивостями цих систем.

При витіканні рідини з насадки екструдера відбувається зміна граничних умов від прилипання до руху з вільною поверхнею. В результаті з'являються внутрішні напруження в рідині. Для цієї ситуації важко отримати аналітичне

рішення. При вирішенні подібних завдань застосовують або числові методи, або експериментально досліджують явище екструзійного розбухання.

У технологічній практиці ефект розбухання оцінюють коефіцієнтом, під яким розуміють відношення діаметра екструдату до діаметру формуючого отвору в каналі. Як відомо, діаметр потоку полімеру виявляється збільшеним в порівнянні з діаметром профілюючого каналу і це збільшення може наблизитися до трикратного. При екструзії складних профілів, неоднорідність розбухання на різних ділянках їх перетину може призводити до спотворення профілю аж до повної неможливості отримання виробів заданої конфігурації.

Неоднорідність розбухання екструдату при виході з різних ділянок формуючого інструмента призводить до різних ступенів спотворення перерізу виробу, що особливо важливо враховувати при виробництві виробів складного профілю. Найбільша складність при проектуванні екструзійних головок для виробництва профільних погонажних екструзійних виробів полягає у визначенні необхідної геометрії профілюючих каналів формуючих інструментів. Вона залежить як від реологічних властивостей матеріалу, так і від технологічних параметрів процесу екструзії та геометрії формуючих каналів головки.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень ефекту розбухання, що приводяться в літературі, в переважній більшості випадків отримані при витіканні розплавів полімерів з циліндричних каналів [20, 21, 22] і тільки у роботах [19, 23] містяться дані по розбухання для випадку видавлювання розплавів полімерів через канали більш складних профілів.

Ніккель зі співробітниками [24] моделював розширення ньютонівських рідин при течіях з малими числами Рейнольдса. Він показав, що зсувні напруження на виході зменшуються, але одночасно з'являються поздовжні напруження, і що течія стає невіскозиметричною в області виходу з екструдера. На поверхні виникає сила розтягування, а на осі симетрії стискаюча сила.

Аналогічні завдання вирішували Джордж із співробітниками в роботах [25-26]. Вони використовували техніку сингулярних кінцевих елементів, завдяки чому значно підвищилась точність розрахунків і збільшилася швидкість збіжності числового рішення.

Завдання розширення струменя ньютонівської рідини з числами $Re > 100$ вирішили Лью з співробітниками [27]. При малих числах Рейнольдса розбіжності з експериментальними даними мали місце тільки безпосередньо біля виходу з формуючого каналу.

Експериментальні дослідження Аллаїна зі співробітниками [28] по розширенню потоку при екструзії полісахариду з великою молекулярною масою показали, що він виявляє властивості ступеневої рідини, при швидкостях зсуву від 980 c^{-1} до 3600 c^{-1} . Вони використовували ксантан різної концентрації і визначили відстань від виходу з екструдера, на якій відбувається остаточне формування потоку. Відстань, на якій потік змінював свою конфігурацію збільшується прямо пропорційно швидкості зсуву.

Моделюванням течій неньютонівських рідин, що проявляють пружні властивості, займалися також Берадо і Фортин зі співробітниками [29]. Вони використовували багатопараметричну модель Фан-Тьен-Таннера і досліджували

зміну конфігурації профілів вільної екструдованої поверхні при довгих і коротких насадках. Ними встановлено, що під час екструзії на довгих насадках профіль струменя встигає розвиватися аналогічно експериментальним даним, а для коротких насадок спостерігається розходження з експериментальними даними.

У ряді робіт [30-33] використовувалося умова проковзування в околиці виходу з формуючого каналу екструдера. Це дозволило деяким чином згладити різку зміну граничних умов. Сілліман і Скрайвен [30] досліджували течію ньютонівської рідини з лінійною функцією проковзування на стінці. Вони показали, що перша різниця нормальних напружень та розширення струменя зменшуються з ростом проковзування. Досить враховувати проковзування на відстані порядку 0,18 напівширини каналу від виходу з екструдера. Подальше збільшення області проковзування не впливає на виникаючі напруження.

Вессон і Паланастазі [31] використовували умову проковзування на стінках формуючих каналів при дослідженні течії в'язкопружних рідин. Вони отримали рішення для течій з більш високими числами Вайссенберга, ніж у випадку умови прилипання.

Фан-Тьєн [32] досліджував залежність коефіцієнта проковзування для різних рідин, грунтуючись на даних експериментів Рамамурті [33]. Він показав, що проковзування виникає, коли напруження на стінках досягають певної критичної величини. Наявність проковзування веде до зменшення ефекту розширення потоку. Однак, його результати відрізняються від даних Вессона і Паланастазі [31] для критичних чисел Вайссенберга.

Моделюванням неізометричної течії в'язкопружної рідини на виході з формуючого каналу екструдера займалися Луо і Таннер [34] і Баракос і Мітсуліс [35]. Вони показали залежність профілю утворюваного струменя від різниці температур на стінках вихідного каналу екструдера. Спостерігалось вигинання струменя в бік більш холодної стінки навіть для ньютонівських рідин.

У роботі [36] встановлено, що при витіканні всіх видів досліджуваних розплавів полімерів з каналів складної форми спостерігається різке збільшення коефіцієнта розбухання в області значень низьких тисків. При підвищенні температури для всіх досліджуваних полімерів і каналів кінцеве значення коефіцієнта розбухання зростає. Результати досліджень також свідчать про вплив геометрії формуючого інструмента на розбухання розплавів полімерів. Найбільше значення коефіцієнта розбухання спостерігається при течії розплаву полімеру в каналі виду "облицювальна планка", де пояснюється наявністю виступаючих кутів. У кутах при напірній течії розплаву полімеру виникають концентрації напруження і при виході полімеру вони збільшують поперечний переріз екструдату. Отримані результати добре узгоджуються з результатами досліджень авторів [37-39].

В роботі [40] досліджено високоеластичне відновлення потоку розплаву полімеру при екструзії полімерних оболонок. Встановлено, що при витіканні екструдату з формуючого каналу відбувається збільшення товщини стінок і розмірів поперечного перерізу виробу. Це пояснюється в'язкопружними властивостями розплаву полімерів, тобто спостерігається процес високоеластичного відновлення струменя [41]. Величина розбухання досягає максимального значення при збільшенні тиску (до 2-3 МПа), а потім у міру збільшення до певного значення

зменшується. При подальшому підвищенні тиску величина розбухання залишається практично постійною. Величина розбухання зростає також зі зменшенням довжини формуючого каналу.

Недоліком представлених робіт по дослідженню явища екструзійного розбухання [17, 36, 40] є те, що для опису ефекту розбухання при екструзії полімерів через канали складного перетину були використані прості алгоритми розрахунку, які не описують в'язкопружну поведінку течії полімерів та не враховують коефіцієнт проковзування матеріалу у формуючому каналі.

Форма потоку розплаву і положення перерізу його максимального розбухання залежить від ступеня витяжки та реологічних властивостей матеріалу [42]. За відсутності витяжки переріз з максимальними розмірами знаходиться на найбільш віддаленій відстані від фільтри, із збільшенням витяжки переріз з максимальними розмірами наближається до фільтри, а поперечні розміри його зменшуються.

Розбухання полімерних матеріалів присвячено велику кількість теоретичних і прикладних робіт. Найбільший інтерес для практичного використання представляють ті роботи, в яких розглядається залежність високоеластичної деформації від реологічних властивостей матеріалу і технологічних режимів екструзії, а також дається математичний опис процесів, що розвиваються [43,44]. Це сприяє науково-обґрунтованому конструюванню каналів екструзійних головок.

В роботах [42-46] для врахування пружних властивостей реальних рідин використовувалось контрваріантна модель Максвелла релаксаційного типу, але недоліком даної моделі є те, що вона є однією з найпростіших в'язкопружних моделей і вона рекомендується лиш тоді, коли доступно мало інформації про течію полімеру через формуючі канали головок. В представлених роботах дослідження поведінки течії екструдату через формуючі канали інструменту проводився методом контрольних об'ємів з використанням модифікованого алгоритму SIMPLER, який не враховує коефіцієнт проковзування розплаву полімеру в формуючих каналах головки екструдера.

У роботі [47] зроблено огляд причин розбухання і констатується, що точне передбачення величини розбухання на основі наявних теорій поки неможливо, оскільки вплив ряду факторів залишається ще неясним.

Наведені у літературі рекомендації [48-50] з вибору розмірів формуючих каналів головок побічно враховують прояв розплавом високоеластичних властивостей. Наприклад, з метою врахування цього явища для конкретного полімерного матеріалу рекомендується дещо збільшити або зменшити той чи інший розмір поперечного перерізу формуючої щілини і встановити для неї певну відносну довжину. Ці практичні рекомендації вироблені при зіставленні розмірів одержуваних виробів з виконавчими розмірами встановленої екструзійного оснащення. Недолік подібних рекомендацій, однак, полягає в тому, що вони можуть суттєво відрізнятися у різних авторів навіть для одних і тих же полімерних матеріалів. Тому потрібні об'єктивні методи розрахунку, які можуть перевірятися в практичній роботі і коректуватися при необхідності.

Таким чином, високоеластична деформація на виході розплаву з головки визначається в'язкопружними властивостями полімерів, напруженнями і деформаціями на вході в формуючий канал і в ньому, швидкістю течії і часом релаксації.

1.2 Течія і розбухання розплавів полімерів через канали складної форми

З точки зору технології переробки пластмас великий інтерес представляє виявлення кореляції між реологічними властивостями полімерних матеріалів і параметрами переробки, що впливають, наприклад, на перепад тиску в формуючих каналах, розподіл швидкостей, в'язкопружну поведінку і формоутворюючу здатність. Точне теоретичне вирішення задачі про течію в'язкопружних рідин через канали більш складної геометричної форми, ніж кругла труба або плоска щілина, в загальному вигляді отримати дуже важко. Тому конструювання формуючих інструментів досі проводилося в основному методом «проб і помилок», і досягнення в цій галузі трималися різними фірмами з переробки пластмас у секреті.

Предметом значної кількості досліджень служило також течія полімерних матеріалів через канали з конічними входами. У багатьох екструзійних головках, наприклад у формуючих інструментах, використовуваних для отримання волокон або екструзії труб, конфігурація входної зони набагато складніша, ніж циліндр з плоским входом. Конічний вхід в екструзійних головках рекомендують застосовувати з двох основних причин. Перша полягає в тому, що при конічному вході вдається уникнути утворення застійних зон в кутах віскозиметричних резервуарів. Важливо підкреслити, що в промислових умовах переробки в деяких полімерах при затримці їх в застійній зоні можуть відбуватися зшивання і (або) деструкція, а за допомогою каналів з конічним входом можна виключити ці небажані явища. Друга причина використання каналів конічної форми полягає в можливості підвищення продуктивності процесу формування завдяки збільшенню значень критичних швидкостей зсуву, тобто тих швидкостей, починаючи з яких виникає явище нестійкої течії, або так зване "руйнування потоку".

На рисунку 1.1 показана схема теоретично прогнозованих вторинних течій в конічному каналі. Зазначимо, що вторинні циркуляційні течії розплавів полімерів відзначалися також в капілярах з плоским входом [19]. Крім того, добре відомо, що для усунення вторинних течій кут входу в канал необхідно виконувати меншим, ніж кут, утворений конвергентними потоками розплаву.

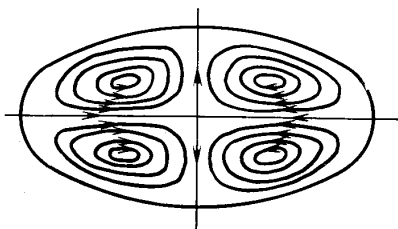


Рисунок 1.1 – Схема вторинних течій в'язкопружної рідини в трубі з еліптичним поперечним перерізом

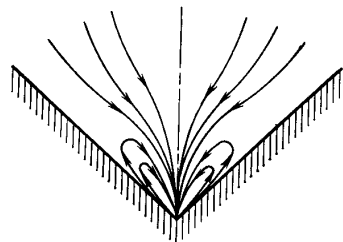


Рисунок 1.2 – Схема вторинних течій в'язкопружної рідини в конічному каналі

В даний час немає теоретичних формул, які можна було б використовувати для розрахунку і конструювання каналів довільного перетину або для розрахунку перепаду тиску і ступеня розбухання полімерних матеріалів, що екструдуються через канали складної форми.

В роботі [19] проведено аналіз течії неньютонівських в'язкопружних рідин в каналах складної форми, з використанням різних реологічних рівнянь стану. Автори прийшли до висновку, що течію в'язкопружних рідин в таких каналах при постійному перепаді тиску можна розглядати як суто поздовжню і лише незначна частина середовища залучається до так званої вторинної течії (рисунк 1.2).

Для того, щоб виявити напрямки руху частинок при вторинних течіях (виникають, наприклад, у каналах складної конфігурації), визначальне рівняння необхідно вирішити щодо всіх трьох складових руху, в той час як у відсутність вторинних «потоків» достатнім виявляється рішення тільки осевої складової рівняння руху. Труднощі розв'язання рівняння руху при розгляді вторинних течій пов'язані зазвичай з дуже складним видом реологічних рівнянь стану для в'язкопружних рідин. Веллер і Уіслер [31] числовим методом вирішили рівняння руху, отримані при аналізі течії рідини Рейнера - Рівліна в каналі квадратного перетину, і визначили таким чином напрямку вторинних течій. Слід вказати на те, що експериментальні роботи в цій області відстають від теоретичних досліджень.

З метою спостереження особливостей руху розплавів полімерів у каналах складної форми Хан [19] проводив експерименти по видавлюванні різних сумішей несумісних полімерів і вивчав розподіл матеріалів в екструдерах за фотографіями їх мікроструктури.

У літературі багато уваги було приділено явищу розбухання екструдату після виходу з круглого отвору і відносно мало описано це явище для насадок некруглого перетину. Перша спроба виявити кількісний зв'язок між розбуханням екструдату після його виходу з прямокутного каналу з реологічними характеристиками рідини була зроблена Ханом [19].

При продавлюванні екструдату поліетилену високої густини крізь канал прямокутного перерізу з відношенням сторін (більшої сторони прямокутника до меншої), рівним 6 звертають на себе увагу два факти. По-перше, розбухання полімеру більше на довгій стороні прямокутного каналу, ніж на короткій, причому максимального значення розбухання струменя досягає в центрі довгої сторони. По-друге, чим більше об'ємна швидкість течії, тим сильніше розбухання екструдату (рисунк 1.3). Ці результати узгоджуються зі спостереженнями при течії в'язкопружних рідин через круглі труби.

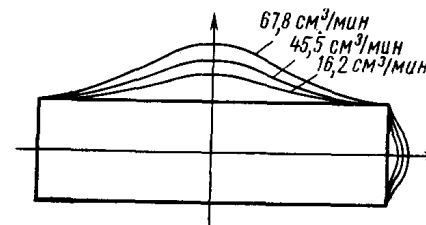


Рисунок 1.3 – Схематичне зображення розбухання екструдату при різних об'ємних швидкостях течії

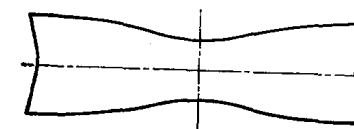


Рисунок 1.4 – Поперечний переріз фільери (типу "собака кістка"), придатної для одержання екструдату прямокутного перерізу

Неоднорідність розбухання екструдату при виході з прямокутних каналів призводить до виникнення серйозних проблем при отриманні виробів прямокутної

форми. Наприклад, необхідним стає видалення матеріалу з набряклого боку профільного виробу. Ця додаткова операція збільшує вартість переробки за рахунок регенерації відходів. Однак удосконалення конструкції формуючого інструмента (рисунок 1.4) дозволяє отримати прямокутний екструдат і виключити стадії видалення і переробки відходів. Складність, однак, полягає у визначенні кривизни довгої і короткої сторін прямокутника, яку необхідно передбачити при конструюванні екструзійної головки. Ця кривизна каналу буде залежати від реологічних властивостей перероблюваного матеріалу і від таких технологічних параметрів переробки, як об'ємна швидкість течії і температура розплаву. На жаль, в даний час немає точних, теоретично обґрунтованих формул для розрахунку кривизни стінок формуючих мундштуків, і необхідні подальші теоретичні дослідження з метою вирішення цього надзвичайно складного завдання.

На рисунку 1.5 представлені експериментальні дані зміни нормальних напружень ПЕВТ при 180° С. З рисунка видно, що нормальні напруження на стінці, виміряні вздовж середньої лінії довгої сторони перерізу, більші, ніж нормальні напруження уздовж середньої лінії короткої сторони. Світлі значки відповідають довгій стороні перерізу каналу, темні - короткою. На рисунку 1.6 дано графіки залежності градієнта тиску ($-dp/dz$) уздовж середньої лінії довгої сторони перерізу каналу від об'ємної швидкості течії. Можна вважати, що ці криві «еквівалентні» звичайним кривим течії полімерів в круглих каналах. Проте використання терміна «криві течії» в даному випадку неправомерно, так як градієнти швидкості і тиску на стінці змінюються вздовж обох сторін прямокутника. Графіки на рисунку 1.6 ілюструють важливий факт, а саме те, що залежність градієнта тиску від об'ємної швидкості в ньютонівській області течії підпорядковується степеневому закону.

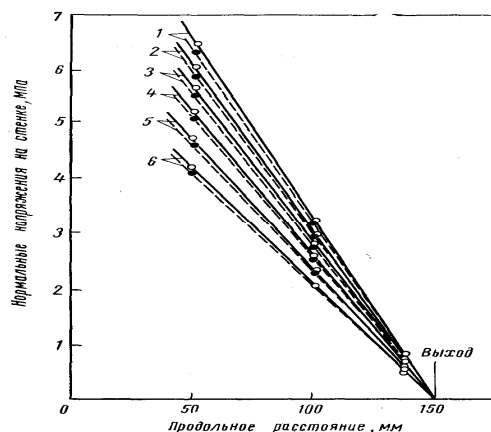


Рисунок 1.5 – Профіль зміни нормальних напружень на стінках прямокутного каналу вздовж середніх ліній довгої і короткої сторін [19]
Об'ємна швидкість течії: 1 – 97,1 см³/хв; 2 – 72,6; 3 – 65,7; 4 – 47,6; 5 – 36,6; 6 – 26,5 см³/хв.

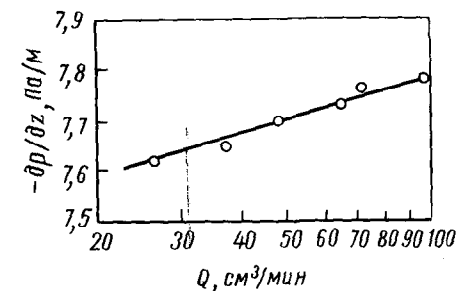


Рисунок 1.6 – Залежність перепаду тиску від об'ємної швидкості течії [19]

На рисунку 1.7 наведено графік залежності залишкового тиску розплаву ПЕНП на виході з формуючого каналу від об'ємної швидкості течії. Так як зазначене тиск на виході можна розглядати як міру оборотної пружної енергії, накопиченої в рідині, то вид кривої на рисунку 1.7 пояснює дві важливі особливості розбухання екструдату, зазначені вище. По-перше, той факт, що тиск на виході в центрі довгої сторони перерізу каналу більше, ніж у центрі короткої стінки, добре узгоджується із співвідношенням коефіцієнтів розбухання в тих же точках суміжних сторін насадки. По-друге, підвищення залишкового тиску розплаву при зростанні швидкості течії також узгоджується з тим, що збільшення швидкості деформування викликає посилення розбухання полімеру.

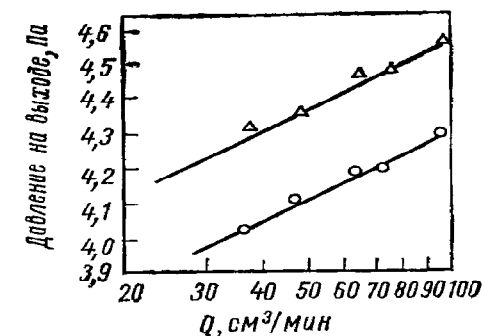


Рисунок 1.7 – Вплив об'ємної витрати в процесі течії, в центрі довгою (Δ) і короткою (O) сторін поперечного перерізу [19]

Таким чином, можна зробити висновок про те, що неоднорідність розподілу розбухання екструдату, корелює з нерівномірністю профілю нормальних напружень при виході розплаву з каналу прямокутного перерізу.

Основним недоліком наявних досліджень є те, що запропоновані вирішення проблем по усуненню розбухання екструдату ґрунтуються на методі проб і помилок, тобто не існує розробленої методики по числовому розрахунку даної проблеми та алгоритму її вирішення.

1.3 Числові дослідження течії неньютонівських рідин

Числовим моделюванням течій неньютонівських рідин займається велика кількість дослідницьких груп. На даний момент є два узагальнюючих огляди на цю тему [51,52].

Більшість робіт сконцентровано на стаціонарних течіях з використанням простих конститутивних рівнянь (Максвелла, Олдройда-В). При цьому найбільший інтерес дослідників сконцентровано на течіях з великим числом Вайссенберга. Труднощі, пов'язані з поганою збіжністю числових схем при великих числах Вайссенберга для збіжних течій, пов'язані з утворенням піків напружень поблизу місця звуження, що призводять до числової нестійкості.

Існує не дуже багато публікацій, присвячених числовому рішенням задачі про течію неньютонівських рідин в областях складної геометричної форми. У роботі Вайта, Гостіса і Берда [53] представлений огляд експериментальних і числових робіт, присвячених впливу величини числа Вайссенберга на особливості числової реалізації проблеми. Ці особливості пов'язані насамперед з тим, що величина числа Вайссенберга впливає на вибір реологічної конститутивної моделі і на спосіб дискретизації області течії. Експериментальні роботи Еванса і Уолтерса [54], Богера, Хе і Біннінгтона [55] показали вплив типу каналу що звужується, ступеня звуження, швидкості потоку і реологічних властивостей рідини на форму і розміри циркуляційних течій поблизу місця звуження.

Останнім часом значний інтерес для дослідників представляють числові дослідження тривимірних течій [56-59]. У цих дослідженнях все частіше використовується метод контрольного об'єму.

Аналіз числових досліджень течії неньютонівських рідин показав, що переважна більшість досліджень проводилась на простих геометріях формуючих каналів, зокрема циліндричних та прямокутних, та відсутність даних по числовому дослідженню формуючих каналів складної геометрії. Канал має ступінчасту конфігурацію, що представляє із себе різке звуження, і являється складовим елементом формуючої головки екструдера.

У початкових роботах присвячених дослідженню течій в'язкопружних рідин в плоских каналах, як правило, використовувалися методи скінчених елементів і скінчених різниць. У роботах Кроше [63] використана скінченноелемента техніка. В їх роботах швидкість апроксимована за допомогою ермітових скінчених елементів. Граничне значення числа Вайссенберга, одержане ними, $We = 2.19$. Вище цього значення числа Вайссенберга збіжність числової процедури порушувалася.

З експериментальної точки зору вкрай складно простежити вплив реологічних характеристик окремо на досліджувану течію. Причому вплив кожної характеристики бажано досліджувати незалежно від інших характеристик. Ці труднощі пов'язані з тим, що в реальних полімерних рідинах пружні ефекти присутні спільно з аномалією в'язкості і появою ефекту поздовжньої в'язкості. Присутній також ще цілий ряд інших специфічних ефектів, характерних для неньютонівських рідин. Всі ці ефекти присутні і проявляються в різному ступені і в різних комбінаціях. Тому завжди з'являється бажання ізолювати ці ефекти. Це

може бути зроблено числовим моделювання шляхом вибору відповідних конститутивних реологічних моделей. Однак виникають серйозні проблеми, пов'язані з утворенням великих пружних напружень у кутових точках каналу.

1.3.1 Аналіз та обґрунтування моделі в'язкопружної поведінки розплавів полімерів

Течія неньютонівських рідин має деякі суттєві особливості порівняно з ньютонівськими. Однією з таких особливостей є можлива нееволюційність використовуваної реологічної моделі. Це проявляється в тому, що при описі конкретних типів течії одні рівняння стану дають вірні результати, а інші приводять до парадоксів.

Теорія побудови моделей конститутивних рівнянь реологічного стану є досить складним розділом прикладної математики. Виникають численні труднощі, для успішного подолання яких необхідне знання деяких основних принципів інваріантності. Ігнорування цих принципів, як правило, приводить дослідників до моделей, які описують неадекватно досліджувані процеси.

Для виявлення основних особливостей при деформуванні та течії доцільно класифікувати реальні текучі системи. Чисто в'язкі рідини діляться на ньютонівські і неньютонівські. Ці рідини, у яких швидкість зсуву залежить тільки від прикладеної напруження зсуву. Вони не володіють пам'яттю їх історії деформації.

Рідини, реологічні властивості яких залежать від часу. До них відносяться неньютонівські рідини, для яких швидкість зсуву залежить від напруження і тривалості деформації. В'язкопружні системи. Це матеріали, для яких напруження зсуву залежить від історії деформації. Вони володіють пам'яттю. До складних реологічних систем відносяться рідини, які проявляють одночасно комбінацію вищезазначених властивостей.

При виборі відповідних реологічних співвідношень варто керуватися певними вимогами. Рівняння повинні: 1) передбачати аномалію в'язкості; 2) описувати нормальні напруження; 3) описувати зсувні і динамічні експериментальні дані; 4) пояснювати релаксаційні явища; 5) відповідати експериментальним даним.

Перераховані ефекти свідчать про складну механічну поведінку високомолекулярних рідин, основною особливістю яких є накладення пружних високоеластичних ефектів на необоротну течію і прояв структурних змін в процесі деформування.

Існуючі реологічні співвідношення не в змозі повністю описати всі реальні властивості матеріалів. Однак, будь-яка математична модель дає корисний опис певних властивостей деяких реальних матеріалів при обмежених умовах деформування. Реологічні співвідношення можуть також служити передумовою для отримання розумних спрощених співвідношень, застосовуваних для вирішення різних завдань за конкретних умов течії.

Для побудови загальної теорії рідини з пам'яттю була аксіоматично введена "проста рідина". Теорія простої рідини будується на наступних принципах:

1) детермінізм напруження; 2) локальна дія; 3) не існування природного стану; 4) загасаюча пам'ять.

Принцип детермінізму напружень полягає в тому, що напруження в даний момент часу не залежить від майбутніх деформацій, а залежить тільки від минулих деформацій. Принцип локальної дії означає, що напруження в даній точці однозначно визначається історією деформування в довільно малій околиці даної матеріальної точки. Неіснування природного стану означає, що всі можливі форми існування еквівалентні, а будь-яке розрізнення в напруженому стані є наслідком відмінності в історії деформування. Принцип затухаючої пам'яті можна сформулювати наступним чином: вплив минулих деформацій на поточну напруження у слабкіший для більш віддаленого минулого, ніж для недавнього.

Рівняння стану можна підрозділити на три типи: 1) диференціальні; 2) інтегральні і 3) релаксацийні.

До першого типу належать рівняння, що визначають тензор напруження як функцію диференціальних кінематичних величин, що відносяться лише до моменту спостереження. У рівняннях другого типу тензор напружень визначається за допомогою одного або декількох інтегралів.

Рівняння стану релаксацийного типу містять щонайменше одну похідну за часом від тензора напружень. Швидкість зміни (або релаксація) напруження дає назву цьому типу рівнянь.

Одним з найпростіших способів модифікації рівняння стану рідини для врахування пружних властивостей рідини є введення до реологічних рівнянь адитивного члена неньютонівської рідини, що містить похідну за часом від напруження

$$\tau + \lambda \dot{\tau} = 2\mu \dot{D}, \quad (1.1)$$

де $\dot{\tau}$ використовується для позначення похідної за часом від тензора напруження, Па/с; а λ – час релаксації, с; μ – динамічна в'язкість, Па·с; $\dot{D} = \frac{1}{2}(\nabla \bar{v} + \bar{v} \nabla)$ – тензор швидкості деформації, с⁻¹, де ∇ – оператор Гамільтона, м⁻¹; \bar{v} – вектор швидкості, м/с.

Додавання члена, що містить тимчасову похідну, дає можливість представляти за допомогою цього рівняння явище релаксації напруження, характерного для рідин з пам'яттю.

Релаксацийне рівняння Максвелла, що враховує пружні властивості рідин

$$\tau + \lambda \left(\left(1 - \frac{a}{2} \right) \bar{v} \tau + \frac{a}{2} \dot{\tau} \right) = 2\eta \dot{D}, \quad (1.2)$$

де $\bar{v} \tau$ – верхня конвективна похідна за часом в'язкопружного екстра-напруження

$$\bar{v} \tau = \bar{v} \cdot \nabla \tau - (\nabla \bar{v} \cdot \tau - \tau \cdot \nabla \bar{v}^T), \quad (1.3)$$

$\dot{\tau}^A$ – нижня конвективна похідна за часом в'язкопружного екстра-напруження:

$$\dot{\tau}^A = \bar{v} \cdot \nabla \tau + (\bar{v} \nabla \cdot \tau + \tau \cdot \nabla \bar{v}) \quad (1.4)$$

$$\nabla \bar{v} = \frac{\partial v_i}{\partial x_j}. \quad (1.5)$$

Швидкість релаксації напруження регулюється значенням часу релаксації λ . Параметр a – довільним числом, проте з позитивності в'язкості.

Так звані моделі сім'ї Олдройта (в тому числі моделі Максвелла, Олдройта-В, Уайт-Метцнера, Фан-Тьєн-Таннера, і Джисекуса) підкоряються диференціальним рівнянням, записаних в показниках тензора екстра-напружень τ_1 і являються найбільш реалістичними і розповсюдженими у використанні при розрахунку в'язкопружності течії розплавів полімерів.

Модель Фін-П включає в себе рівняння, записане з точки зору тензора форми, а модель ПОМ-ПОМ складається з двох рівнянь, записаних у показниках тензора орієнтації і змінного розтягування. Модель Леонова для наповнювачів включає в себе три рівняння: для вільних макромолекулярних ланцюгів; для захоплених макромолекулярних ланцюгів; для структурної (порушення зчеплення) змінної, яка характеризує перехід макромолекулярних ланцюгів від захопленого до вільного стану. В'язкопружний тензор екстра - напружень пов'язаний з тензором форми або тензором орієнтації і змінним розтягуванням через алгебраїчні рівняння. Це дозволяє здійснювати числові розв'язання задач в'язкопружних течій з використанням моделей Фін-П, ПОМ-ПОМ або Леонова.

Рівняння імпульсу у безрозмірній формі представляється у вигляді:

$$\begin{aligned} Re \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{v} \cdot \nabla \bar{v} \right) &= -\nabla p + \nabla \cdot \tau_1 + \beta \nabla^2 \bar{v} \\ \nabla \cdot \bar{v} &= 0 \\ \tau_1 + We \tau &= 2(1 - \beta) \dot{D}, \end{aligned} \quad (1.5)$$

де параметр $\beta = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}$ є відношення часів релаксації; p – зовнішній

гідростатичний тиск, Па. Зазвичай це співвідношення приймається рівним 1/9 [62].

Числа Рейнольдса та Вайссенберга визначаються в наступній формі

$$Re = \frac{\rho v l}{\eta}, \quad We = \frac{\lambda_1 v}{l}, \quad (1.6)$$

де ρ – густина, кг/м³; v – характеристична швидкість, м/с; l – характеристична довжина, м; η – динамічна в'язкість, Па·с. У ряді публікацій

замість числа Вайссенберга використовується число Дебори [63]. В якості аргументу функції розбухання екструдату (β) використовується число Дебори (De), яке являє собою відношення часу релаксації полімеру до часу проходження ним формуючої ділянки. У цьому випадку співвідношення між числами Вайссенберга і Дебори визначаються значеннями характерної швидкості і характерної довжини. Прийнято вважати, що $De = 3We$.

Верхня-конвективна модель Максвелла [64] є однією з найпростіших в'язкопружних визначальних рівностей. У ній представлені постійні в'язкості і квадратичне рівняння різниці нормального напруження. З урахуванням її реологічної простоти, модель рекомендується тільки тоді, коли доступно мало інформації про течію, або коли достатній якісний прогноз. Незважаючи на свою числову простоту, ця модель може бути складна з обчислювальної точки зору.

Для будь-якого реального полімеру, рекомендується перейти, принаймні на модель Олдройта-В [65]. Як і модель Максвелла, також одна з найпростіших в'язкопружних установчих моделей. Вона дещо краще, ніж модель Максвелла, так як вона дозволяє включення в'язкої компоненти додаткового напруження, яке може призвести до кращої поведінки числової схеми. Модель Олдройта-В є гарним вибором для рідин, що володіють дуже високою екстенціональною в'язкістю.

Конститутивне реологічне рівняння моделі Олдройта-В зводиться до верхньої конвективної моделі Максвелла, коли характерний час ретардації дорівнює нулю і до ньютонівської рідини при рівності характерного часу релаксації і ретардації. Для моделі Олдройта-В пружна компонента обчислюється за [65].

Модель Уайт-Метцнера [65], дозволяє відтворювати певні віскозиметричні особливості течії. В'язка компонента розраховується за необхідністю. Модель Уайт-Метцнера здатна характеризувати такі віскозиметричні функції, як зсув непотоньшення і не квадратичну різницю першої нормальної напруження, які характеризують більшість рідин. Модель Уайт-Метцнера також передбачає додаткову пружність, допускаючи використання різних функцій для залежностей швидкості зсуву від в'язкості і часу релаксації. Коли експериментальні дані зсувної в'язкості і різниці першої нормальної напруження доступні, можна легко отримати матеріальні параметри для моделі Уайт-Метцнера апроксимаційною кривою.

Незважаючи на свої цікаві властивості з віскозиметричної точки зору, модель Уайт-Метцнер іноді призводить до фіктивних коливань в розчині при високих швидкостях зсуву. В результаті переважають моделі ФТТ, Джисекуса і Фін-П.

Модель ФТТ [65] є універсальною реологічною моделлю, що дозволяє з високою точністю прогнозувати аномалію в'язкості розплаву полімеру і наявність поздовжньої в'язкості в течіях, обумовлених нормальними напруженнями, добре описує течію полімерів, для яких характерна наявність в'язкопружної поведінки.

Тим не менш, модель ФТТ вимагає приєднання в'язкої компоненти до тензора додаткового напруження для забезпечення стійкості. Модель ФТТ забезпечує слабкий контроль зсувної в'язкості при високих швидкостях зсуву при використанні одного часу релаксації. Використання декількох режимів релаксації може поліпшити контроль.

Як і модель ФТТ, модель Джисекуса є однією із самих реалістичних диференціальних в'язкопружних моделей. У ній представлені розрідження при

зсуві і неквадратичні рівняння різниці нормального напруження при високих швидкостях зсуву.

Недоліком цієї моделі Джисекуса є те, що ненульове значення матеріальної константи призводить до обмеженої стійкості об'ємної в'язкості і залежності швидкості зсуву від зсувної в'язкості. Для цієї моделі в'язка компонента повинна бути додана в тензор екстра-напруження для забезпечення стійкості.

Модель Фін-П походить від молекулярної теорії. У найпростішому поданні, молекули описуються як гантелі, побудовані з двох сфер, сполучених нелінійною пружиною. Однак, на відміну від моделі Максвелла пружини допускають тільки кінцеве розширення, так що енергія деформації гантелі стає нескінченною для кінцевого значення пружинного подовження. Ця модель являється дуже складною для визначення матеріальних констант для розрахунку течій в'язкопружної рідини.

В'язкопружне матеріальне рівняння, так звана модель Пом-Пом, була представлена Макліш і Ларсоном [66]. Приблизна диференціальна форма моделі заснована на рівняннях макромолекулярних орієнтацій, і макромолекулярних розтягувань у зв'язку з орієнтаційними змінами [66]. Модель зазнає подальших змін і покращення, щоб зробити її придатною для впровадження в програмне забезпечення і введення ненульової другої різниці нормального напруження.

Аналіз сучасних зарубіжних публікацій [67-72] у сфері дослідження ефектів розбухання та оптимізації форми полімерних погонажних профілів при в'язкопружній течії показав, що при розрахунку екструзійного формування автори в своїх роботах використовують реологічні моделі ФТТ та Джисекуса, але через недоступність матеріальних констант для цих моделей автори користуються, які приведені в прикладах розрахункових програм і тільки при дослідженні стаціонарних простих течій розплавів полімерів.

Враховуючи всі плюси і недоліки існуючих реологічних моделей, можна зробити висновок про доцільність використання для числових досліджень реологічну модель ФТТ або Джисекуса. В зв'язку з доступністю експериментального визначення матеріальних реологічних констант для досліджуваної групи полімерів перевагу слід віддати моделі ФТТ.

1.4 Висновки

Аналіз аналітичного огляду існуючих зарубіжних і вітчизняних публікацій по дослідженню течій високоеластичного розплаву полімеру в каналах, характерних для течій у формуючих інструментах промислових екструдерів, показав недостатню дослідженість особливостей течії в'язкопружних рідин в зонах виходу з формуючих каналів більш складного перетину ніж круглий або прямокутний та відсутність методик профілювання формуючих каналів для компенсації ефекту розбухання.

Дослідження течій високоеластичного розплаву полімеру в каналах, характерних для течій у формуючих інструментах промислових екструдерів, останнім часом стає особливо актуальним. Це пов'язано з наявними на сьогоднішній момент невирішеними технологічними проблемами екструзійного формування профільних погонажних виробів методом вільної екструзії, існуючими в полімерній промисловості.

Необхідність врахування при розрахунку розмірів формуючих каналів високоеластичних властивостей розплаву в даний час не піддається сумніву. Дослідження в цьому напрямку тривають, в тому числі із застосуванням числових методів розрахунку і комп'ютерного моделювання. Результатом подібних робіт, мабуть, повинні бути рекомендації, засновані на дослідженнях основних промислових марок полімерних матеріалів екструзійного призначення, які були б прийнятні для практичного використання конструкторами і технологами без проведення трудомістких робіт по знаходженню необхідних для розрахунку характеристик матеріалів.

При числовому моделюванні течії розплаву полімеру в формуючому інструменті потрібно враховувати не тільки складну в'язкопружну поведінку полімерів, пов'язану зі здатністю полімеру запасати пружну енергію, причому остання частково може бути повернута розплавом, внаслідок його високоеластичності, а й вплив конструктивних параметрів формуючого інструмента на неоднорідність екструдату.

Встановлено, що при витіканні екструдату з формуючого каналу (на виході з нього) відбувається збільшення (розбухання) товщини стінок і розмірів поперечного перерізу виробу. Це пояснюється в'язкопружними властивостями розплаву полімерів. Розбіжності у визначенні межі тисків при яких відбувається максимальне значення розбухання полімеру по даним робіт [36, 40] очевидно пояснює вплив геометрії каналу.

Аналіз робіт і в'язкопружних реологічних моделей показав, необхідність врахування при розрахунку умов проковзування і в'язкопружних властивостей течії розплаву полімеру у формуючих каналах інструменту та доцільність використання найбільш реалістичної і якісної реологічної моделі, яка враховує явище розбухання, моделі ФТТ.

Практичне освоєння нових технологій і модернізація існуючих потребує детального вивчення течій розплавів полімерів у каналах, характерних для формуючих інструментів промислових екструдерів, що використовуються при виробництві полімерних погонажних виробів.

2 МАТЕМАТИЧНЕ ТА ЧИСЛОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ФОРМУВАННЯ ВИРОБІВ ЕКСТРУЗІЙНИМ МЕТОДОМ

Важливість врахування ефектів пам'яті для полімерних розплавів зумовлює необхідність застосування відповідних матеріальних рівнянь для моделювання їх поведінки в процесах переробки полімерів особливо на стадії формування виробів. Протягом останніх 10 років [75,76], значні успіхи були досягнуті в числовому моделюванні двовимірних (2D), а також і для тривимірних (3D) задач стаціонарного потоку рідини, зокрема проблеми розбухання екструдату. Такі проблеми розглядалися в роботах Буша та Фан-Тьєна [77], Тран-Конг та Фан-Тьєна [78] Карагіаніса зі співавт. [79], Шиоджима з Шімазакі [80], Вамберсія і Крочета [81], Легата і Маршала [82].

Основними цілями даного розділу є розглянути експериментальне і числове моделювання, пов'язане з розбуханням екструдату в'язкопружного матеріалу на виході з формуючого каналу для широко використовуваних полімерних матеріалів. Методику числового моделювання передбачається базувати на методі елементарного струменя з визначенням і використанням матеріальних реологічних констант конститутивного рівняння ФТТ.

На основі проведеного огляду стану досліджень технології виробництва профільних полімерних погонажних виробів і методів конструювання екструзійних головок актуальною є розробка удосконаленої математичної моделі, яка дозволить розрахувати параметри процесу з врахуванням ефекту розбухання полімеру в зоні вільної поверхні на виході з формуючого каналу, а також здійснювати обґрунтований розрахунок геометрії формуючих каналів головки в залежності від в'язкопружних властивостей перероблюваних полімерних матеріалів і технологічних параметрів процесу екструзійного формування.

2.1 Математична модель процесу екструзійного формування профільних погонажних виробів

Розглядаємо задачу течії полімеру в формуючому каналі незмінного перерізу за таких припущень:

- процес екструзії стаціонарний;
- течія розплаву – ізотермічна;
- рідина нестислива ($\rho = \text{const}$);
- сили інерції нехтовно малі порівняно з силами в'язкості: $Re \ll 1$;
- швидкість на стінці не дорівнює нулю, присутнє проковзування: $v|_{\text{стінки}} \neq 0$.

Математичну модель екструдуювання утворює система рівнянь нерозривності та руху [83]:

$$\begin{cases} \nabla \cdot \vec{v} = 0; \\ \rho \left[\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} \right] = -\nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau}, \end{cases} \quad (2.1)$$

де ∇ – оператор Гамільтона, м^{-1} ; $\bar{\mathbf{v}}$ – вектор швидкості, м/с ; t – час, с ; ρ – густина, кг/м^3 ; p – зовнішній гідростатичний тиск, Па ; $\bar{\boldsymbol{\tau}} = 2\eta(\dot{\gamma})\dot{\mathbf{D}}$ – тензор в'язких напружень другого рангу, Па ; $\dot{\mathbf{D}} = 1/2(\nabla\bar{\mathbf{v}} + \bar{\mathbf{v}}\nabla)$ – тензор швидкості деформації, с^{-1} ; $\eta(\dot{\gamma})$ – в'язкість рідини як функція другого інваріанта $\dot{\gamma}$ від $\dot{\mathbf{D}}$, $\text{Па}\cdot\text{с}$; $\dot{\gamma} = \sqrt{2(\dot{\mathbf{D}}:\dot{\mathbf{D}})}$ – другий інваріант від $\dot{\mathbf{D}}$, с^{-1} .

Пристінні ефекти на стінці (зсувна компонента напруження τ) описуються узагальненим законом Нав'є [62]

$$\tau = -F_{\text{slip}}|\mathbf{v}_s - \mathbf{v}_w|^{e_{\text{slip}}}, \quad (2.2)$$

де \mathbf{v}_s – тангенціальна компонента швидкості течії, м/с ; \mathbf{v}_w – тангенціальна компонента швидкості стінки, м/с ; F_{slip} – коефіцієнт ковзання (тертя) на поверхні каналу, $\text{кг}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$; e_{slip} – параметр матеріалу. Пристінні ефекти враховуються з роботи [84].

Реологічний закон стану матеріалу

Узагальнене конститутивне рівняння максвелівського типу, яке використовується для в'язкопружної рідини може бути записано у вигляді (1.2).

Напруження, що накопичується в полімерному середовищі, представляється у вигляді суми двох компонент із в'язкопружної і пружної частин [61]

$$\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\tau}_1 + \boldsymbol{\tau}_2, \quad (2.3)$$

В якому в'язкопружна і пружна компоненти обчислюються з рівнянь:

$$\boldsymbol{\tau}_1 + \lambda_1 \overset{\nabla}{\boldsymbol{\tau}}_1 = 2\eta_1 \dot{\mathbf{D}}, \quad (2.4)$$

$$\boldsymbol{\tau}_2 = 2\eta_2 \dot{\mathbf{D}}, \quad (2.5)$$

де λ_1 – час релаксації, с^{-1} ; $\overset{\nabla}{\boldsymbol{\tau}}_1$ – верхня конвективна похідна за часом в'язкопружного екстра-напруження (1.3); пружна компонента $\boldsymbol{\tau}_2$ розраховується за помітних змін об'єму полімеру.

У рівняннях (2.4) η_1 – динамічна в'язкість, $\text{Па}\cdot\text{с}$; а η_2 – об'ємна в'язкість, $\text{Па}\cdot\text{с}$ (в наших задачах не враховується, розплав вважаємо нестисливим).

Величини η_1 і η_2 зв'язані співвідношеннями:

$$\begin{aligned} \eta &= \eta_1 + \eta_2, \\ \lambda_2 &= \frac{\eta_2}{\eta} \lambda_1. \end{aligned} \quad (2.6)$$

Для в'язкопружної моделі ФТТ, загальний тензор екстра-напружень в'язкопружної компоненти $\boldsymbol{\tau}_1$ обчислюється із співвідношення

$$\exp\left[\frac{\varepsilon\lambda}{\eta_1}\boldsymbol{\tau}_1\right]\boldsymbol{\tau}_1 + \lambda\left[\left(1 - \frac{\xi}{2}\right)\overset{\nabla}{\boldsymbol{\tau}}_1 + \frac{\xi}{2}\overset{\Delta}{\boldsymbol{\tau}}_1\right] = 2\eta_1\dot{\mathbf{D}} \quad (2.7)$$

і пружна компонента $\boldsymbol{\tau}_2$ розраховується за (2.5). ξ і ε – це матеріальні параметри, які визначають зсувну в'язкість і розширювальну здатність розплаву, відповідно. Зокрема, ненульове значення ξ призводить до обмеження стійкості об'ємної в'язкості. Значення часу релаксації λ_1 для розплаву полімеру знаходиться з експериментально визначеного часу, за який екструдат набуває 1/3 своєї кінцевої форми після виходу з фільтри, а параметр ε – з числового встановлення форми екструдату до збігу з експериментально визначеною формою потоку стабілізації перерізу екструдату.

Пружна компонента $\boldsymbol{\tau}_2$, як правило, інтерпретується як складова напруження полімерних розплавів, або як реакція напруження, пов'язана зі швидким режимом релаксації.

Апроксимація закону в'язкості для розглянутих полімерів здійснювалась за експериментальними даними. Наприклад, коефіцієнт в'язкості для в'язкопружної компоненти визначений по перехресному закону (CrossLaw) для знаходження в'язкості ПВХ

$$\eta_1 = \frac{\eta_0}{1 + (\lambda\dot{\gamma})^m}, \quad (2.8)$$

де η_0 – в'язкість за нульової швидкості зсуву, $\text{Па}\cdot\text{с}$; λ – час релаксації, с ; m – показник. За усталеної зсувної одновісної течії локальна швидкість зсуву зменшується до градієнта швидкості.

Для дослідження умов розширення потоку в'язкопружної рідини на виході з формуючого отвору проводиться аналіз напруженого стану середовища, що виникає в екструдаті в області виходу за наступних граничних умов:

- 1) на вході у формуючий канал задається витрата розплаву або нормальна швидкість

$$\mathbf{G} = \mathbf{G}_{\text{inlet}} \quad \vee \quad \mathbf{n} \cdot \mathbf{v} = v_{\text{inlet}}, \quad (2.9)$$

де $\mathbf{G} = \mathbf{G}_{\text{inlet}}$ – об'ємна витрата розплаву, $\text{м}^3/\text{с}$; $\mathbf{v} = v_{\text{inlet}}$ – швидкість полімеру на вході в головку, м/с ; \mathbf{n} – вектор нормалі до вільної поверхні;

- 2) на виході екструдату з формуючого каналу приймається нульовий тиск

$$\mathbf{n} \cdot \nabla p = 0; \quad (2.10)$$

- 3) на стінці каналу враховуються пристінні ефекти за законом Нав'є (2.2);

4) на вільній поверхні екструдату задаються умови рівноваги і нульове значення швидкості розбухання:

$$\begin{cases} \tau_{ii} = (\boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{n}) \cdot \mathbf{n} = p - HS \\ \mathbf{v} \cdot \mathbf{n} = 0, \end{cases} \quad (2.11)$$

де H – кривизна вільної поверхні, м^{-1} ; S – питома сила поверхневого натягу, Н/м .

Для аналізу процесу вільного формування погонажних виробів екструзійним методом розглядається область течії розплаву полімеру в зоні виходу з формуючого отвору, яка обмежена відношенням його довжини до діаметру в межах -3 до 3. Від'ємні значення означають область формуючого отвору перед виходом з нього. У нульовій позиції знаходиться вихід з формуючого отвору насадки екструдера, а позитивні – в області вільної течії екструдованого профілю.

Схема екструзійної течії розплаву полімеру на виході з формуючого каналу головки та на виході з нього з граничними умовами представлена на рисунку 2.1.

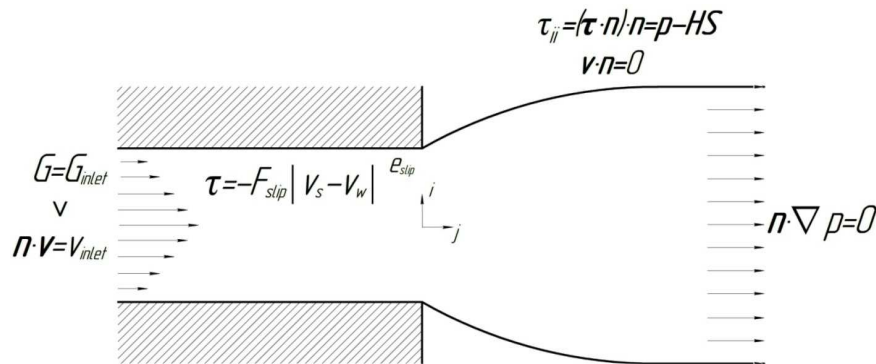


Рисунок 2.1 – Схема течії розплаву полімеру на виході з формуючого каналу головки з граничними умовами

На вході в канал задається повністю розвинена течія. В області формуючого каналу головки швидкість руху розплаву полімеру має повністю розвинений профіль, а на виході з каналу розглядаються умови сталого потоку. На виході з каналу задаються граничні умови фон Неймана, при цьому передбачається, що перетин виходу знаходиться на достатній відстані для досягнення сталої течії. На стінках екструдера виконується умова проковзування, на вільній поверхні тангенціальні напруження дорівнюють нулю, нормальні напруження збалансовані поверхневим натягом, застосована умова непроникності.

2.2 Експериментальне дослідження параметрів реологічної моделі

Проведення експериментів з дослідження параметрів реологічної моделі, яка використовується для врахування в'язкопружної поведінки розплаву полімеру при математичному описі процесу екструзії крізь формуючий канал головки круглого поперечного перерізу здійснювали на черв'ячно-пластикаційному пристрої діаметром 36 мм з відношенням довжини до діаметру рівним 20, оснащений

головкою з довжиною формуючого каналу 40 мм та діаметром 8 мм, що гарантувало наявність повністю розвиненого потоку на виході з формуючого каналу.

Після виходу на робочий температурний режим в живильний бункер завантажувалася досліджуваний полімерний матеріал. Приводився в обертання черв'як. За сталого режиму екструзії розплаву полімеру з головки через певний час t екструдат відрізувався по торцевій поверхні формуючого каналу. Час відсікання екструдату t вибирався таким чином, щоб відсічений відрізок мав довжину від 50 до 100 мм (для зменшення помилки експерименту і полегшення подальших досліджень). Отримані зразки екструдату (3-4 зразка для кожного із значень обертів черв'яка) зважувалися на аналітичних вагах марки ВЛА - 200 -М.

Середнє значення маси для i -ої серії при n послідовних дослідів, визначали як середнє арифметичне за формулою [86]

$$m_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n m_{ij}. \quad (2.12)$$

Однорідність вимірювань характеризується дисперсією D_i , яка визначається згідно [87] за формулою

$$D_i = (\sigma^2)_i = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (m_{ij} - m_i)^2. \quad (2.13)$$

Для оцінки відтворюваності розраховано критерій Кохрена (розрахунковий) $k_{кр}$ згідно з формулою

$$k_{кр} = \max D_i / \sum_{i=1}^m D_i, \quad (2.14)$$

де $\max D_i$ – найбільше значення дисперсій з числа розглянутих паралельних серій m .

Перевірка виконання умови відтворюваності експерименту, шляхом порівняння значення розрахункового критерію Кохрена $k_{кр}$ з табличним значенням $k_{кр}$ відповідно з нерівністю [88, 89]: $k_{кр} \leq k_{кр}$.

Експеримент ставився за умов стабільності вибраного режиму екструзії при продуктивності 3 кг/год. Продуктивність визначалась ваговим методом та регулювалась зміною обертів черв'яка.

Експерименти, проведені по дослідженню розбухання полімерного матеріалу пов'язані з каналом круглого поперечного перерізу діаметром 8 мм і довжиною 40 мм, яка вважається досить довгою, щоб забезпечити наявність повністю розвиненого потоку на виході з формуючого каналу.

Довжина фотофіксації вільної ділянки екструдату не перевищувала 30 мм, так що провисання під дією сили тяжіння було незначним, як раніше показано Жилет і Серіаї [90]. Розмір екструдованого виробу був виміряний в напрямку відповідно до руху полімеру на виході з формуючого інструменту за допомогою

фотооптичного пристрою. Методика дозволила визначити форму вільного потоку. Експериментальна установка показана на рисунку 2.2.

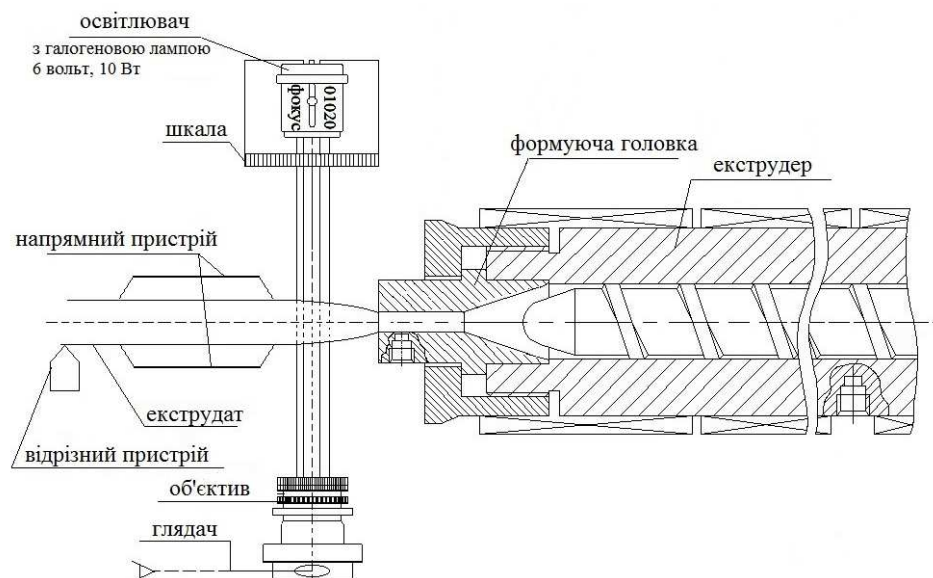


Рисунок 2.2 – Схема експериментальної фотооптичної установки вимірювання параметрів моделі ФТТ

Максимальна відстань для вимірювань екструдату була обмежена 30 мм. Фотографії представляють додаткову інформацію для встановлення форми вільного струменя, особливо на відстані за течією від вихідного перетину менше 1 мм. Приклади виду на полімерний струмінь наведені у фотографіях рисунку 2.3.

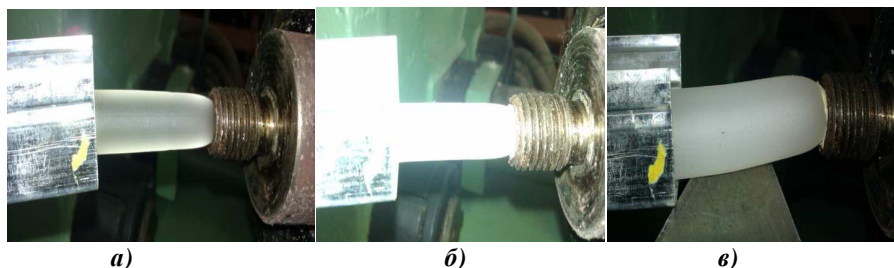


Рисунок 2.3 – Фотофіксація вільної поверхні екструдату
а – ПЕВТ; б – ПВХ; в – ПС

Характеристика досліджуваних полімерних матеріалів

Дослідження реологічних і гідродинамічних властивостей проводилася для наступних полімерних матеріалів:

а) поліетилен високого тиску (ПЕВТ 15803-020) за ГОСТ 16337;

б) полістирол (ПС-115) за ГОСТ 20282;

г) композиція полівінілхлориду (ПВХ) марки SorVyl Німеччина.

Температури дослідження при проведенні експериментів для обраних полімерних матеріалів: ПЕВТ 170° С, ПС 180° С, ПВХ 180° С.

Вибір зазначених матеріалів в якості об'єкта дослідження обумовлений їх технологічними властивостями, що задовольняють вимогам, які пред'являються до матеріалів для виготовлення труб і профільних погонажних виробів.

З наведених матеріалів найкращим для застосування у даній продукції визнали композицію ПВХ. Такий висновок був зроблений з аналізу властивостей полімерних труб, виготовлених із зазначених матеріалів. Так згідно [91] вироби з ПВХ мають найвищу тривалу міцність, найнижчий коефіцієнт лінійного розширення, найнижчу теплопровідність, найвищі фізико-механічні показники.

Коефіцієнт лінійного розширення ПВХ в 2 рази нижче, ніж у поліпропілену (ПП). Це забезпечує більш надійну роботу виробів з ПВХ. Характерною властивістю ПВХ є майже необмежена стійкість до кислот і лугів, спиртів, масел, жирів, бензину і морській воді завдяки атомам хлору, які також ускладнюють займистість. Про напірні ПВХ труби відомо, що навіть після 10 років експлуатації на відкритому повітрі показали себе вельми надійними: налип на стінках труб не утворюється, пропускна здатність практично не змінюється. Крім того, труби з ПВХ мають меншу товщину стінки ніж труби з ПЕВТ, ПП, так як допустима напруження для ПВХ в 2 і більше разів вище, ніж у зазначених полімерів.

При витіканні екструдату з формуючого каналу (на виході з нього) реалізується вся накопичена в полімерному матеріалі пружна деформація, обумовлена значними зсувними напруженнями в каналах екструзійної головки. В результаті відбувається розбухання і збільшення розмірів поперечного перерізу виробу, що виходить з головки, що пояснюється в'язкопружними властивостями розплаву полімерів, тобто спостерігається процес високоеластичного відновлення струменя [92].

Експерименти з вивчення процесів високоеластичного розбухання течії розплаву полімеру проводилися в широкому інтервалі температур і тисків (ПЕВТ 15803-020 при температурі $t = 130 - 170^\circ \text{C}$ і тиску $P = 0,5 - 8 \text{ МПа}$; ПС 115 при $t = 180 - 200^\circ \text{C}$ і $P = 0,5 - 8 \text{ МПа}$; композиція ПВХ при $t = 160 - 180^\circ \text{C}$ і $P = 0,5 - 8 \text{ МПа}$). Сутність досліджень полягала в наступному.

Для визначення часу релаксації, коефіцієнту розбухання та розширювальної здатності розплаву для реологічної моделі ФТТ, були проведені такі розрахунки:

$$1. \text{Визначення масової продуктивності } G = \frac{m}{t}, \quad (2.15)$$

де m – маса профілю круглого поперечного перерізу, г; t – час, с;

$$2. \text{Визначення об'ємної продуктивності } Q = \frac{G}{\rho}, \quad (2.16)$$

де ρ – густина досліджуваного матеріалу, кг/м^3 ;

$$3. \text{Лінійна швидкість екструдату } U = \frac{Q}{F_{oms}}, \quad (2.17)$$

де F_{oms} – площа поперечного перерізу отвору формуючого каналу, м^2 ;

4. За допомогою отриманих експериментальних фотографій визначена довжина ділянки профілю l_λ , на якій відбувається стабілізація перерізу (припиняється розбухання екструдату), а отже і довжина, при якій досягається максимальний коефіцієнт розбухання розплаву, для подальшого визначення часу релаксації полімеру.

$$5. \text{Визначення часу релаксації } \lambda = \frac{l_\lambda}{U} \quad (2.18)$$

Визначені матеріальні параметри в'язкопружності розплаву і використані для побудови кривих змін профілю вільної поверхні екструдату на виході з формуючого інструменту, представлені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Експериментальні параметри процесу екструзії

	ПЕВТ 15803-020	ПС 115	Композиція ПВХ
Лінійна швидкість екструдату, U, м/с	0,0857	0,1704	0,0658
Час релаксації, λ , с	0,31	0,03	0,23
Довжина ділянки стабільного перерізу, l_λ , м	0,027	0,0055	0,01525
Коефіцієнт розбухання, B	1,41	1,35	1,2

На рисунках 2.4-2.6 наведено приклади експериментальних даних, що визначають зміну форми екструдату при трьох різних швидкостях потоку. Відкриті і заповнені символи відносяться до різних груп експериментів і можна помітити, що відтворюваність вимірювань є чудовою. Крім того, слід підкреслити, що дані по розбухання екструдату, виведені з фотографій або з оптичних вимірювань добре узгоджуються між собою.

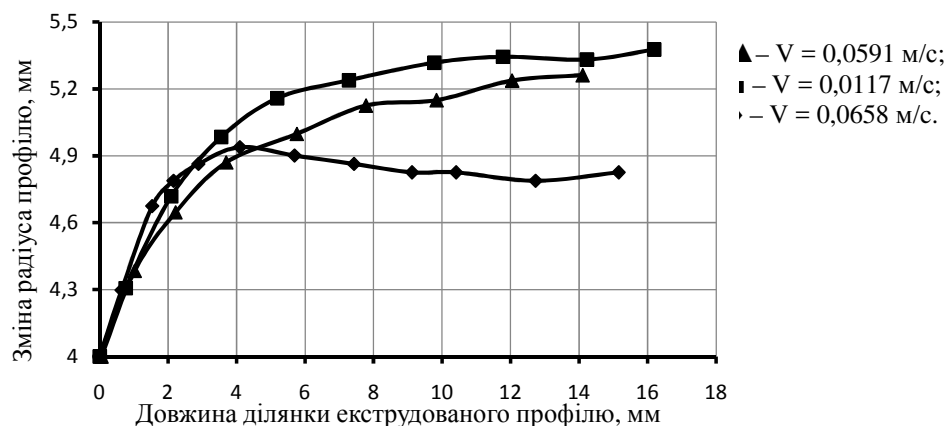


Рисунок 2.4 – Залежність зміни радіуса екструдату круглого поперечного перетину після виходу з формуючого інструменту ПВХ марки SorVyl (Німеччина)

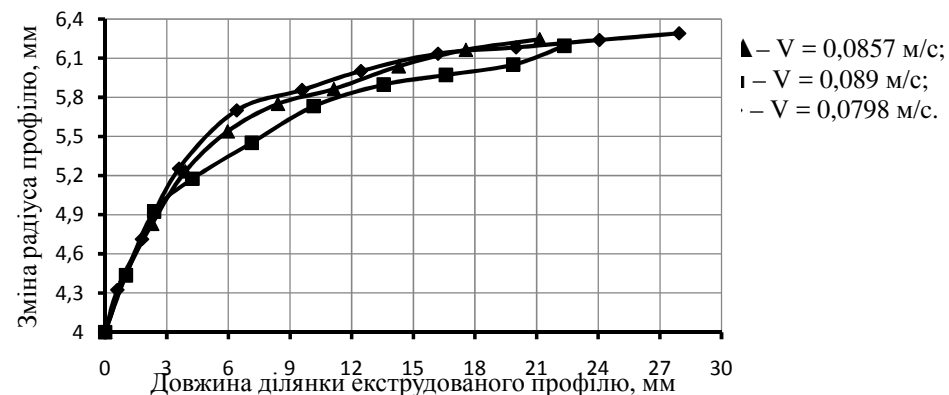


Рисунок 2.5 – Залежність зміни радіуса екструдату круглого поперечного перетину після виходу з формуючого інструменту ПЕВТ 15802-020 ГОСТ 16337-77

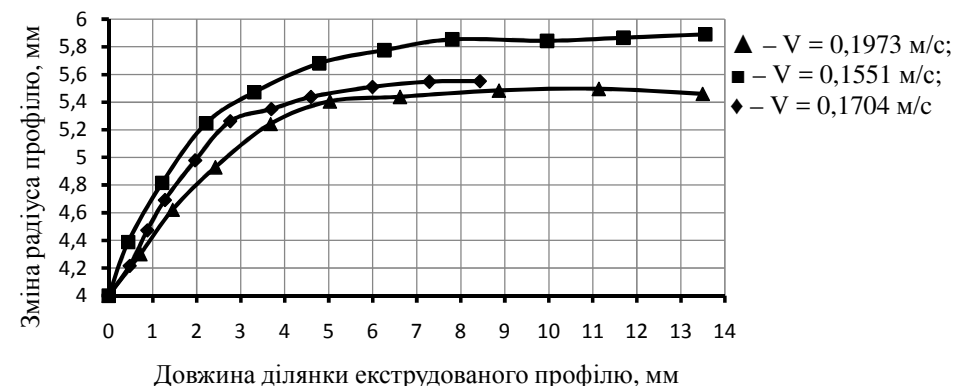


Рисунок 2.6 – Залежність зміни радіуса екструдату круглого поперечного перетину після виходу з формуючого інструменту ПС 115

Аналіз результатів представлених на рисунках 2.4-2.6, показує наявність загальних закономірностей. Так, при екструзії досліджуваних полімерів величина коефіцієнта розбухання спочатку різко збільшується при малих значеннях тиску (до 2-3 МПа), а потім, у міру збільшення останнього, темп зростання зменшується. При подальшому підвищенні тиску величина коефіцієнта розбухання залишається практично постійною. Величина коефіцієнта розбухання зростає також із зменшенням довжини формуючого каналу.

Результати експериментальних досліджень добре узгоджуються з даними наведеними в літературі [93, 94] і мають велике практичне значення. Зокрема, вони використовувалися для розрахунку розмірів формуючого каналу екструзійних головок.

На рисунку 2.7 представлений графік залежності швидкості зсуву від в'язкості для ПВХ марки SorVyl.

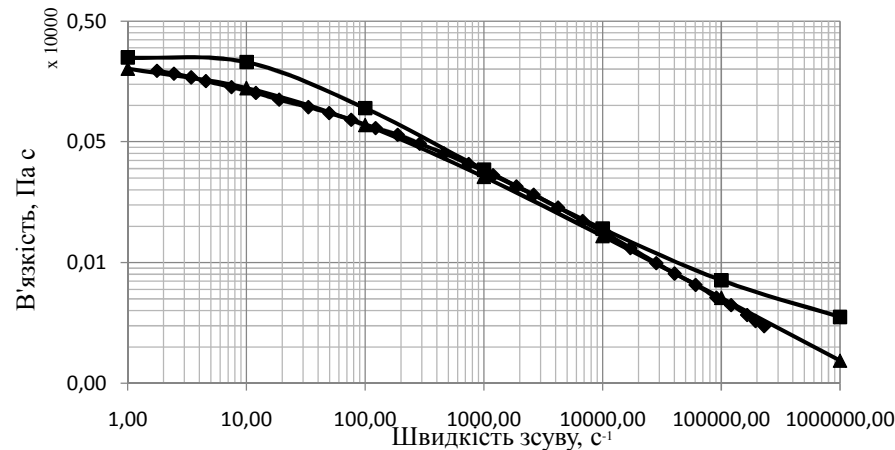


Рисунок 2.7 – Залежність швидкості зсуву від в'язкості для ПВХ
літературні дані залежності: ▲ – CrossLaw, ■ – Berd-Carreau; ♦ – результат чисельного встановлення закону [95]

Коефіцієнт в'язкості для в'язкопружної компоненти (η_1) визначений по встановленому виду перехресного закону (CrossLaw) [98] для знаходження в'язкості ПВХ (2.7).

Експериментальним шляхом були визначені коефіцієнти розбукання та час релаксації полімерів в процесі вільної екструзії і на їх базі були встановлені параметри в'язкопружної реологічної моделі ФТТ [14].

Чисельне моделювання процесу екструзії профілю круглого поперечного перетину було виконано у програмному комплексі «ANSYS» за допомогою програми «Polyflow». Скінченно елементна сітка формуючого каналу головки і вільної поверхні екструдованого профілю представлена на рисунку 2.8. Розглядався формуючий канал круглого поперечного перетину діаметром 8 мм та довжиною 40 мм. Канал був розбитий на 10560 скінченних елементів зі згущенням сітки біля виходу з формуючого каналу.

На відміну від класичних методів, що використовуються в обчисленнях процесу екструзії, дана процедура дозволяє відображення сітки в потоці залишатися незмінним протягом ітераційного процесу. Форма нової вільної поверхні визначається прямим підрахунком невідомих. Ця можливість призводить до значного спрощення чисельного процесу. Моделювання проводилося з метою встановлення реологічного параметру розширювальної здатності розплаву моделі ФТТ для даного полімеру в заданому температурному режимі.

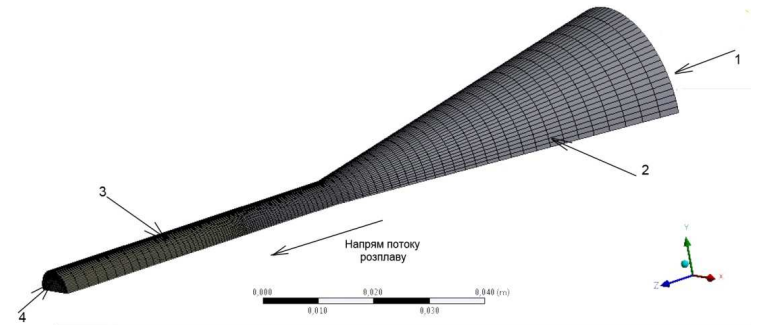


Рисунок 2.8 – Скінченноелементна сітка формуючого каналу головки круглого поперечного перетину і вільної поверхні з граничними умовами
1 – вхід (повністю розвинений потік розплаву); 2 – стінка (умова проковзування); 3 – вільна поверхня ($f_s = 0$, $f_n = 0$, $V_N = 0$); 4 – вихід ($f_n = 0$, $v_s = 0$)

Для визначення оптимальної кількості скінченних елементів для розрахунку геометрії каналів розбивали послідовно зі збільшенням числа на 10000 елементів. Розрахунок повторювався. Отримані результати порівнювались з попередніми, якщо результат відрізнявся більш ніж на 5 %, то процес перерахунку повторювався доти, доки відмінність розрахованих даних від попередніх не перевищувала 5 %.

Результати чисельного моделювання і отриманих експериментальних даних при різних швидкостях потоку зі зміни радіуса екструдату на виході з формуючого інструменту представлені на рисунку 2.9.

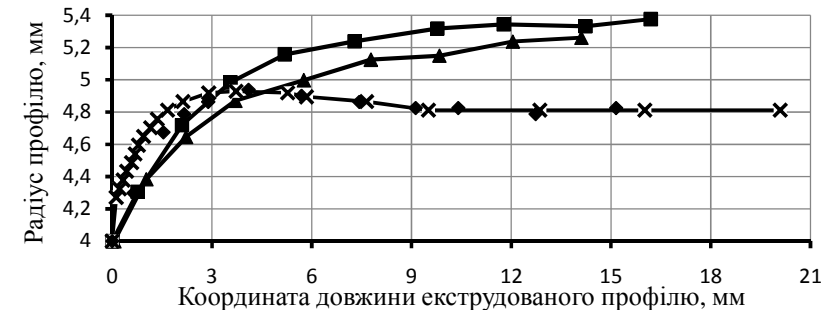


Рисунок 2.9 – Залежність зміни радіуса екструдату круглого поперечного перетину ПВХ марки SorVyl на виході з формуючого каналу
експериментальні дані : ▲ – $V = 0,0591$ м/с; ■ – $V = 0,0117$ м/с; ♦ – $V = 0,0658$ м/с;
× – результат чисельного моделювання

На рисунку 2.9 суцільною лінією зображений результат чисельного моделювання з встановленим матеріальним параметром розширювальної здатності розплаву, а точками – експериментальні дані зміни радіуса екструдату на виході з формуючого інструменту. Графік чисельного моделювання з встановленим параметром розширювальної здатності розплаву збігається з одним із графіків експериментальних даних для швидкості 0,0658 м/с, що демонструє можливість використання матеріальних параметрів, отриманих експериментальним шляхом і

параметру, встановленого шляхом числового моделювання для подальшого використання програмного комплексу для моделювання течії розплаву даного полімеру при формуванні різних погонажних профілів з використання реологічної моделі ФТТ.

2.3 Апробація результатів числового моделювання і експериментального випробування в промислових умовах

З метою перевірки достовірності експериментально встановлених реологічних констант для оцінки ефекту розбухання полімерного в'язкопружного матеріалу після виходу з формуючого інструменту було проведено експериментальне дослідження в умовах діючого наукового виробничого підприємства при виготовленні погонажних профільних виробів, зокрема зубчатого.

Експериментальні дослідження процесу екструзійного формування профільних полімерних погонажних виробів проводився на лінії екструзійного типу з екструдером діаметром 45 мм і співвідношенням довжини черв'яка до його діаметру 25:1, потужність двигуна 15кВт, число зон нагріву 5, число зон охолодження 6. Глибина каналу черв'яка в зоні дозування 3 мм.

Експериментальні дані по отриманню зубчатого профілю типорозміру 30 мм × 4 мм з композиції ПВХ виробництва Німеччини марки SorVul та виробництва України приведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Експериментальні дані формування зубчатого профілю

Назва параметру	Досліджуваний матеріал
	ПВХ
Типорозмір профілю, мм×мм	30×4
Продуктивність, кг/год	16,6
Оберти черв'яка, об/хв	25,7
Температура твердого полімеру, °C	24
Коефіцієнт температурної залежності в'язкості	0.0001
Динамічна в'язкість в каналі профільуючої матриці, Па·с	1500
Коефіцієнт фільтрної витяжки полімеру	1,1
Густина розплаву ПВХ, кг/м ³	1600

Аналогічні дослідження, що проводилися на інших марках сировини показали, що залежно від рецептури композиції експлуатаційні і технологічні параметри процесу значно відрізняються.

Методика проведення експерименту. Під час проведення експериментальних досліджень в якості досліджуваного матеріалу використовувалися гранульований зразок полімерного матеріалу ПВХ марки SorVul виробника Німеччина.

Порядок проведення експериментів та вимірювання параметрів процесу екструзійного формування та оцінки достовірності експерименту полягає у

наступному. Досліджуваний матеріал подається у бункер у вигляді гранул. На блоці керування задається швидкість обертання приводу дозатора. Далі матеріал подається до екструдера, де поступово розігрівається, проходячи кожну з п'яти зон нагріву, температура на кожній з яких задається на блоці керування процесом. Рівномірно розігрітий розплав полівінілхлориду потрапляє до екструзійної головки, де відбувається поступове зниження температури в 6 кроків, температура кожної зони задається на блоці керування. Матеріал, проходячи через формуючий отвір набуває необхідної форми, виходить з формуючого отвору, що ми можемо спостерігати в зоні вільної поверхні. Досить важливим є правильно підібрана швидкість тягнучого пристрою, оскільки полімер повинен охолотитися та релаксувати у охолоджуючій ванні, аби уникнути виникнення дефектів (зміна розміру та форми) що можуть проявлятися не одразу, а поступово.

Експеримент відбувався наступним чином. За допомогою регулятора, що встановлений на блоці керування, встановлювалися необхідна швидкість обертання черв'яка. Експеримент відбувався в режимі вільної екструзії, тобто без витягування екструдату. На виході екструдату з охолоджувальної ванни маркером ставилася мітка на профілі і вимірювався час проходження мітки відстанню 2,75 м. Час вимірювався секундоміром. Дослід при кожній швидкості обертання черв'яка проводився 5 разів. Товщина екструдату вимірювалась мікрометром по 10 точкам кожного зразка. За отриманими даними розраховувалися об'ємні витрати.

За результатами даного експерименту здійснювалась перевірка визначення параметрів реологічної моделі поведінки полімерного матеріалу, з якого формувалася зубчатий профіль.

За допомогою системи ANSYS Polyflow було проведено числове моделювання процесу формування зубчатого профілю на базі встановлених матеріальних параметрів моделі ФТТ. Моделювався процес формування в режимі вільної екструзії, тобто без тягнучого пристрою, що дозволяє йому релаксувати та проявити явище розбухання.

Для підтвердження експериментальних даних був змодельований профіль формуючого каналу зубчатої форми типорозміром 30 мм × 4 мм та довжиною формуючого каналу 50 мм. Експериментально отриманий і змодельований профіль представлено на рисунку 2.10.

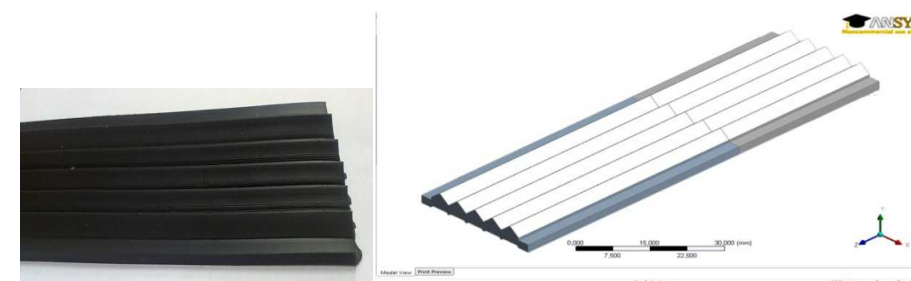


Рисунок 2.10 – Геометрія експериментального і змодельованого зразка зубчатого профілю

Геометричні розміри профілю: 30 мм × 4 мм, довжина головки $L_{\text{гол}} = 0,3$ м; довжина вільного кінця $L_{\text{проф}} = 0,4$ м.

Для розрахунків методом скінченних елементів була побудована сіткова область з 12408 елементів. Використане згущення сітки на межі головка-екструдат, оскільки об'єктом дослідження є саме ця область через проходження в ній перехідних процесів. Отримана сітка представлена на рисунку 2.11.

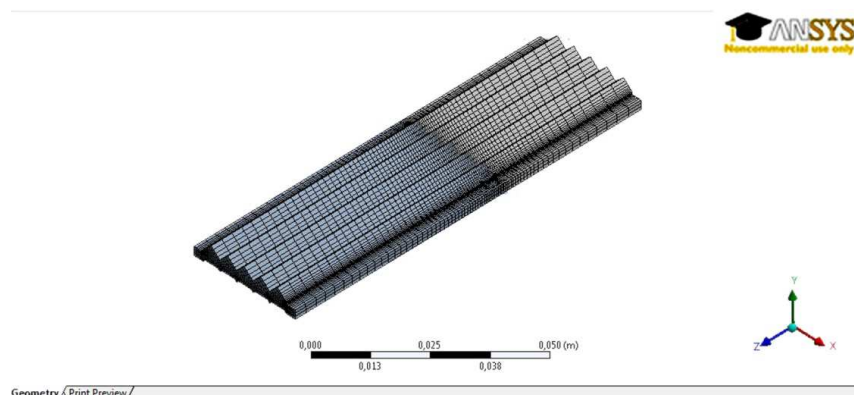


Рисунок 2.11 – Сітка для зубчатого профілю

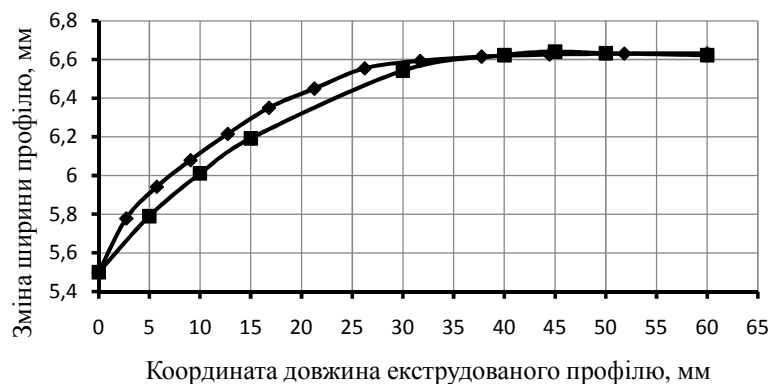


Рисунок 2.12 – Залежність зміни ширини екструдату з ПВХ марки SorVylзубчатого перетину на виході з формуючого інструменту
■ – експериментальні дані $V = 0,0239$ м/с, ♦ – результат числового моделювання $V = 0,0219$ м/с

На рисунку 2.12 зображений результат співставлення експерименту і числового моделювання з встановленим реологічними константами течії в'язкопружного розплаву полімеру. З рисунку видно, що графіки практично співпадають. Це підтверджує можливість використання отриманих числовим моделюванням матеріальних параметрів, на основі експериментальних даних для подальшого використання програмного комплексу ANSYS при моделюванні течії розплаву полімеру різного типу погоняного профілю на виході з формуючого каналу інструменту екструдера з використання реологічної моделі ФТТ.

2.4 Математична модель оберненого проектування каналу профільної погоняної головки

Геометрія формуючого каналу головки визначається шляхом розв'язання оберненої задачі моделювання, де цільовий профіль задається як форма екструдату у напрямку течії. Завдання полягає у визначенні необхідної геометрії формуючого каналу головки на виході, яка визначає вирівнювання швидкостей розплаву в області вільної поверхні і геометрію перетину формуючого профілю.

Для застосування алгоритму початкова обмежена задача перетворюється так, що вона може бути вирішена як серія необмежених задач. Основний підхід полягає в зведенні до мінімуму функції:

$$\Phi(X) = F(X) + f(X) \quad (2.19)$$

де $\Phi(X)$ – псевдо-цільова функція, $F(X)$ – геометричні параметри, які не підлягають зміні (мета), $f(X)$ – це штрафна функція відхилення геометрії формуючого інструменту (похибка), X – являє собою набір проектних змінних (параметри геометрії формуючого каналу).

Метод ФР використовує метод пошукового рядку (ПР), щоб знайти мінімум в заданому напрямку пошуку.

Реалізації алгоритму залежності Флетчера-Рівса для обчислення оберненої задачі екструзії полягає у визначенні геометрії формуючого каналу головки для забезпечення бажаної форми екструдованого профілю.

Стратегія методу Флетчера-Рівса полягає в побудові послідовності точок $\{x^k\}$, $k=0, 1, 2, \dots$ таких, що $f(x^{k+1}) < f(x^k)$, $k=0, 1, 2, \dots$

Точки послідовності $\{x^k\}$ розраховуються за правилом:

$$x^{k+1} = x^k - t_k d_k, \quad k = 0, 1, 2, \dots; \quad d_k = \nabla f(x^k) + b_{k-1} \nabla f(x^{k-1}); \quad b_{k-1} = \frac{\|\nabla f(x^k)\|^2}{\|\nabla f(x^{k-1})\|^2}$$

Величина кроку вибирається з умови мінімуму функції $f(x^k)$ по t в напрямку руху, тобто в результаті вирішення задачі одновимірної мінімізації: $f(x^k - t_k d_k) \rightarrow \min(t_k > 0)$.

При цьому в точках послідовності $\{x^k\}$ градієнти функції $f(x)$ взаємно перпендикулярні.

Побудова послідовності $\{x^k\}$ закінчується в точці, для якої $\|\nabla f(x^k)\| < \epsilon$.

Алгоритм методу Флетчера-Рівса

Початковий етап.

Задати x^0 , $\epsilon > 0$.

Знайти градієнт функції в довільній точці $\nabla f(X) = \left(\frac{\partial f(X)}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial f(X)}{\partial x_n} \right)$

$k=0$.

Основний етап

Крок 1. Обчислити $\nabla f(x^k)$.

Крок 2. Перевірити виконання критерію зупинки $|\nabla f(x^k)| < \epsilon$.

а) якщо критерій виконаний, розрахунок закінчено, $x^* = x^{k_0}$;

б) якщо критерій не виконаний, то перейти до кроку 3, якщо $k = 0$, інакше до кроку 4.

Крок 3. Визначити $d_0 = \nabla f(x^0)$.

Крок 4. Визначити $b_{k-1} = \frac{\|\nabla f(x^k)\|^2}{\|\nabla f(x^{k-1})\|^2}$ чи в разі не квадратичної функції

$$b_{k-1} = \begin{cases} \frac{(\nabla f(x^k), \nabla f(x^k) - \nabla f(x^{k-1}))}{(\nabla f(x^k), \nabla f(x^k))}, & k \notin I \\ 0, & k \in I \end{cases}$$

Крок 5. Визначити $d_k = \nabla f(x^k) + b_{k-1} \nabla f(x^{k-1})$.

Крок 6. Визначити величину кроку t_k з умови $f(x^{k_0} - t_k d_k) \rightarrow \min(t_k > 0)$.

Крок 7. Визначити $x^{k+1} = x^k - t_k d_k$.

Крок 8. Покласти $k = k + 1$ і перейти до кроку 1.

В ході числових та натурних експериментів встановлена кореляція між ними, що підтверджує адекватність розробленої аналітичної моделі та створеної в середовищі програми "Ansys Polyflow" скінченно-елементної моделі, на якій проводились числові експерименти. Результати проведених числових досліджень процесу зміни конфігурації потоку на виході з формуючого інструменту екструдера є основою для уточненого моделювання процесів екструзії розплавів полімерів при проектуванні нових екструзійних головок. Результати також можуть бути застосовані для обґрунтування доцільних режимів процесу екструзії з метою поліпшення якісних характеристик погонажних виробів.

3 МОДЕЛЮВАННЯ ТА ЧИСЛОВИЙ АЛГОРИТМ ПРОЕКТУВАННЯ КАНАЛІВ ФОРМУЮЧОГО ІНСТРУМЕНТУ

3.1 Числовий експеримент для дослідження параметрів течії розплаву полімерів у формуючих каналах профільних погонажних головок

З метою доведення об'єктивності, вірності вибору та перевірки збіжності математичної моделі проводились експериментальні дослідження експериментального зразка профільних погонажних головок. Це також дало можливість вивчити особливості процесу екструзії на прикладі отримання полімерних погонажних виробів.

Числовий експеримент з ціллю порівняння результатів з результатами натурного експерименту та встановлення адекватності вибраної реологічної моделі проводили в системі ANSYS Polyflow, призначеної для розв'язання методом скінчених елементів задач визначення в'язкопружної ньютонівської і неньютонівської течії розплавів полімерів.

За допомогою системи ANSYS Polyflow було проведено числове моделювання течії полімеру з експериментально встановленими матеріальними параметрами моделі ФТТ при екструзійному формуванні полімерних профілів. Всі змодельовані профілі складаються з двох частин: головки та вільного профільованого екструдату після виходу з головки. Профіль виробу моделюється в режимі вільної екструзії, тобто без тягнучого пристрою, що дозволяє полімеру релаксувати та проявити явище розбухання.

Були змодельовані екструдовані профілі наступної геометрії: труба (течія через кільцевий циліндричний канал), суцільний круглий профіль, полий квадратний профіль (течія через квадратний канал), пластинка (прямокутний профіль, довжина якого значно більша за ширину). Для підтвердження експериментальних даних об'єктом дослідження є розроблена головка для отримання профільних погонажних полімерних виробів Ш-подібної форми, форми "рамка" та L-подібної форми.

Для проведення числових досліджень, для всіх профільних виробів формуючих каналів, була побудована досліджувана тривимірна геометрична модель в пакеті SolidWorks у формі каналів головки, а потім вона розбивалась на фрагменти за допомогою графічного інтерфейсу системи ANSYS Polyflow, задавались граничні умови.

3.1.1 Течія через кільцевий циліндричний канал (труба)

Геометрія профілю має наступний вигляд:

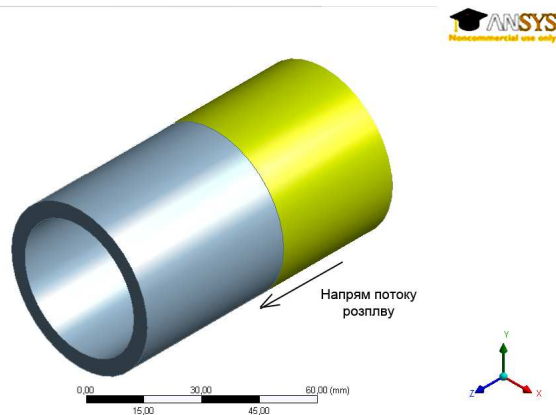


Рисунок 3.1 – Геометрія трубчатого профілю

Геометричні розміри профілю: внутрішній діаметр $D_{\text{внутр}}=0,4$ м; зовнішній діаметр $D_{\text{зовн}}=0,5$ м, довжина формуючого каналу $L_{\text{гол}}=0,3$ м; довжина вільного кінця $L_{\text{проф}}=0,4$ м.

Область моделювання з граничними умовами представлена на рисунку 3.2.

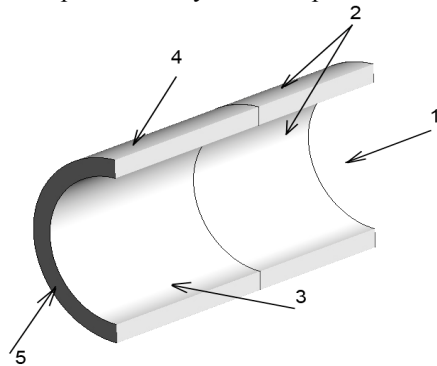


Рисунок 3.2 – Поперечний переріз по вісі симетрії трубчатого профілю з граничними умовами
1 – Вхід (повністю розвинений потік розплаву); 2 – Стінка (умова проковзування); 3 – Симетрія ($v_n = 0, f_s = 0$); 4 – Вільна поверхня ($f_s = 0, f_n = 0, v_n = 0$);
5 – Вихід ($f_n = 0, v_s = 0$)

Для розрахунків методом скінченних елементів побудована сіткова область з 10548 елементів. Було використане згущення сітки на межі головка-екструдат, оскільки об'єктом дослідження є саме ця область через протікання в ній перехідних процесів. Отримана сітка представлена на рисунку 3.3.

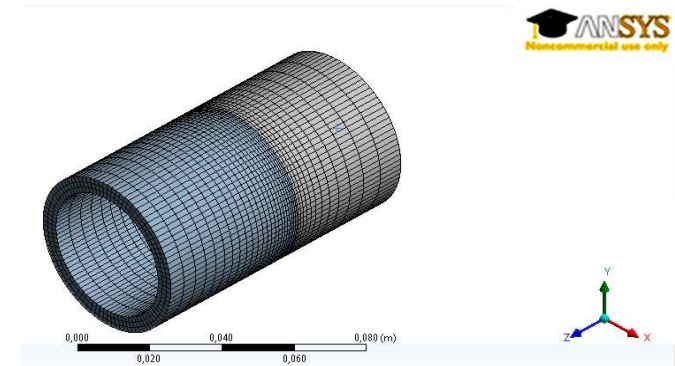


Рисунок 3.3 – Сітка трубчатого порожнього профілю

Розглянемо результати моделювання (рисунок 3.4-3.8).

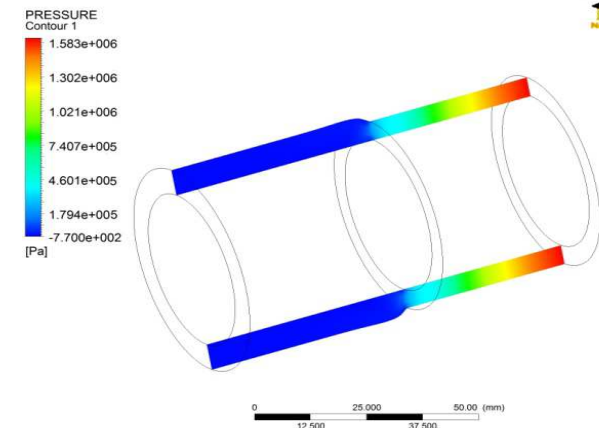
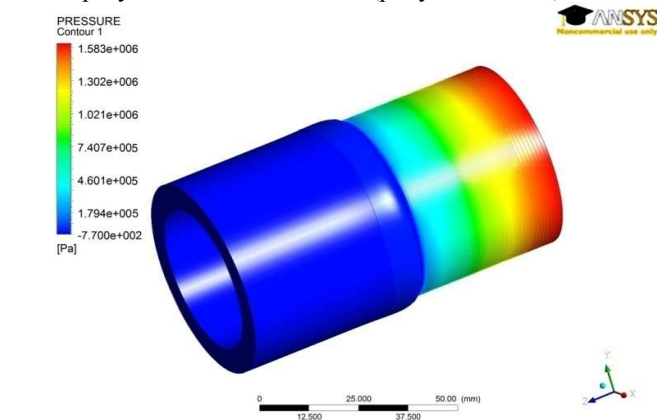


Рисунок 3.4 – Результати розрахунку тиску трубчатого порожнього профілю

Максимальне значення тиску дорівнює 1,583·МПа, яке досягається на вході в екструзійну головку.

Розглянемо поле швидкостей в кільцевому зазорі, що представлено на рисунку 3.5.

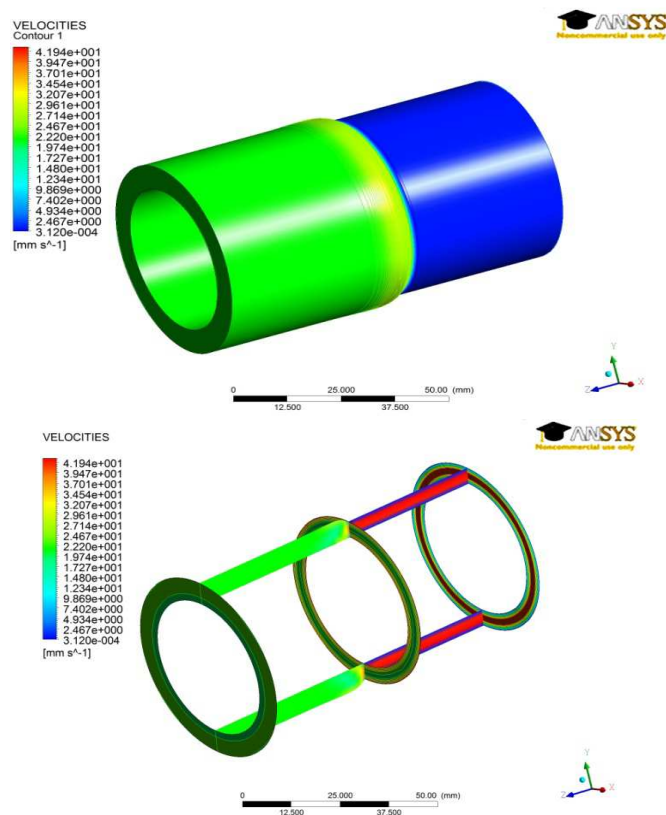


Рисунок 3.5 – Поле швидкостей трубчатого порожнього профілю

Максимальне значення швидкості досягається при вході в головку, а при виході з головки швидкість руху полімеру різко знижується, що пов'язано з тим, що моделюється процес формування в режимі вільної екструзії, тобто після виходу з головки обмежувальні стінки відсутні. Це видно з графіку на рисунку 3.6.

На рисунку 3.7 представлено контури перерізу екструдату на різних відстанях від виходу з головки.

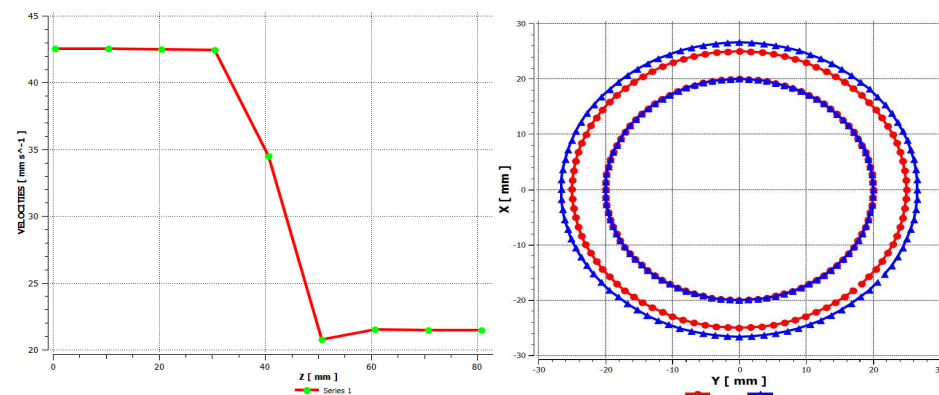


Рисунок 3.6 – Графік розподілу лінійної швидкості по довжині модельованої області

Рисунок 3.7 – Контури поверхні екструдату в поперечному перерізі формуючого каналу головки
● – контур перерізу на виході з головки; ▲ – контур стабілізованого перерізу розмірів екструдату

На рисунку 3.7 видно, що з віддаленням від виходу з головки ефект розбухання найбільш проявляється в кінці вільної поверхні екструдату.

На рисунку 3.8 показаний графік розбухання в повздовжньому напрямку.

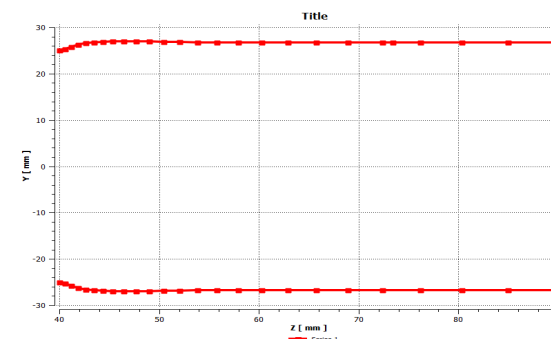


Рисунок 3.8 – Графік зміни форми трубчатого профілю в повздовжньому напрямку

З графіку видно, що ефект розбухання проявляється до відстані в 45 мм від головки, після чого течія стабілізується.

Для оцінки зміни форми вільної поверхні показано результати досліджень зміни радіуса екструдованого трубного профілю, рисунок 3.9. Узагальнена залежність величини розбухання β для п'яти значень числа De на виході з формуючого каналу представлена на рисунку 3.10.

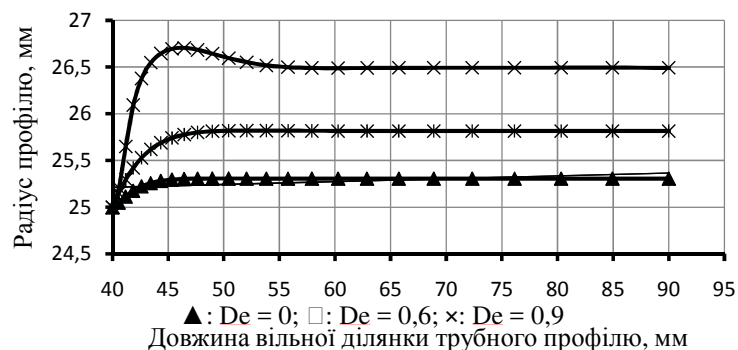


Рисунок 3.9 – Залежність зміни радіуса трубного профілю по довжині вільної ділянки екструдату

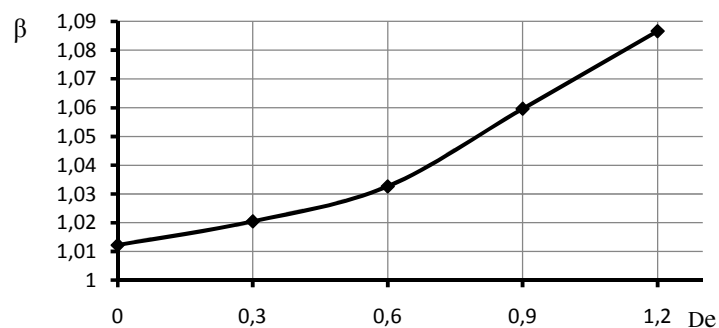


Рисунок 3.10 – Залежність величини розбухання β трубного профілю від числа De

У разі, коли пружні властивості рідини відсутні, число ($De = 0$) і величина розбухання екструдованого трубного профілю складає 3,5 %. Із збільшенням числа Дебори розбухання профілю збільшується і при $De = 0,9$ воно становить 17 %, що значно перевершує значення розбухання потоку ньютонівської рідини. Це пояснюється тим, що перед виходом з формуючого інструмента екструдера неньютонівська рідина має розвинений профіль зсувної течії, а на виході характер розподілу швидкості по перетину поступово вирівнюється і, в кінцевому рахунку, екструдований профіль розбухає і рухається без всяких напружень на зовнішній поверхні.

3.1.2 Течія через формуючий канал круглого поперечного перерізу

Геометричні розміри профілю: зовнішній діаметр $D_{\text{зовн}} = 0,015$ м, довжина формуючого каналу $L_{\text{гол}} = 0,04$ м; довжина вільного кінця $L_{\text{проф}} = 0,06$ м.

Геометрія круглого профілю має наступний вигляд:

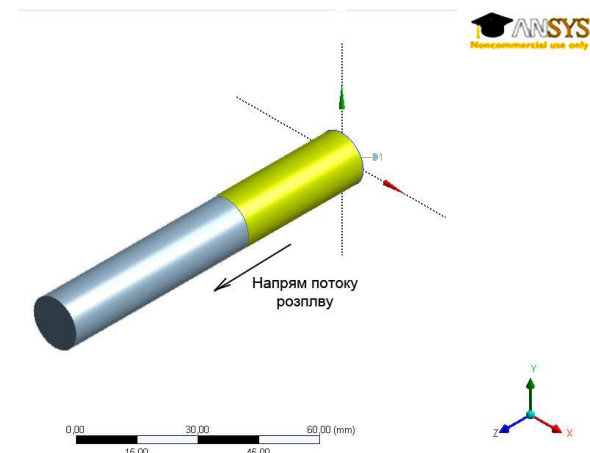


Рисунок 3.11 – Геометрія екструдованого профілю круглого поперечного перерізу

Для розрахунків методом скінчених елементів була побудована сіткова область з 18768 елементів. Було використане згущення сітки на межі головка-екструдат, оскільки нас цікавить саме ця область через протікання в ній перехідних процесів. Отримана сітка представлена на рисунку 3.12.

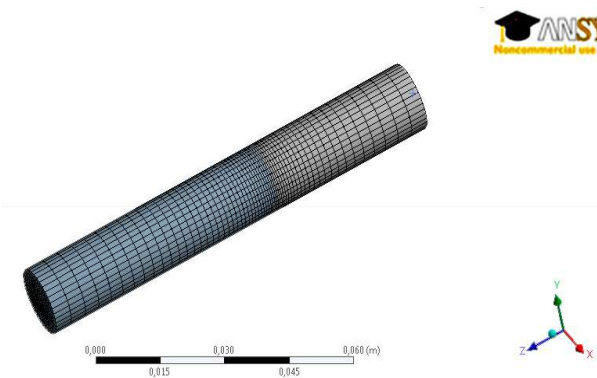


Рисунок 3.12 – Сітка для профілю круглого поперечного перерізу

Область моделювання з граничними умовами представлена на рисунку 3.13.

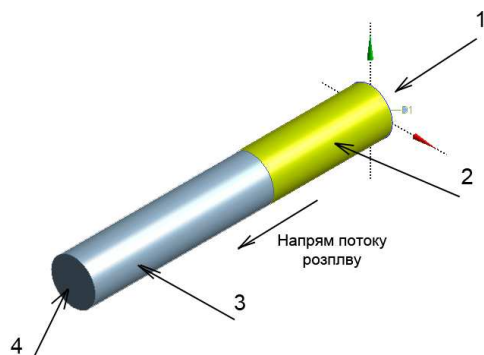


Рисунок 3.13 – Область геометрії профілю круглого поперечного перерізу з граничними умовами
1 – вхід (повністю розвинений потік розплаву); 2 – стінка (умова проковзування);
3 – вільна поверхня ($f_s = 0$, $f_n = 0$, $v_n = 0$); 4 – вихід ($f_n = 0$, $v_s = 0$)

Розглянемо результати моделювання (рисунки 3.14-3.18).

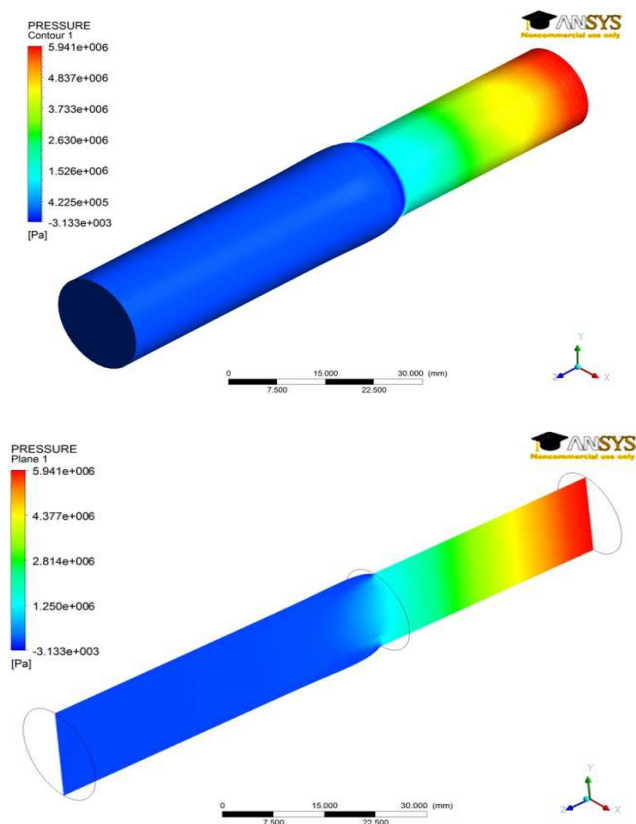


Рисунок 3.14 – Результати розрахунку тиску профілю круглого поперечного перерізу

Максимальне значення тиску дорівнює 5,9-МПа, яке досягається на вході в екструзійну головку.

Розглянемо поле швидкостей в зазорі, що представлено на рисунку 3.15.

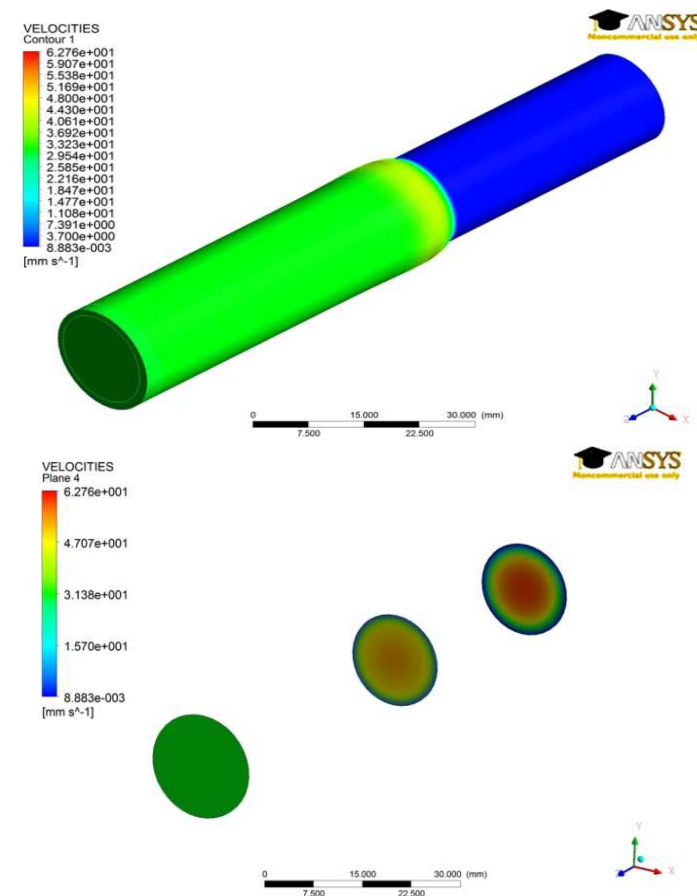


Рисунок 3.15 – Поле швидкостей профілю круглого поперечного перерізу

Максимальне значення швидкості досягається при вході в головку, а при виході з головки швидкість руху полімеру різко знижується, що пов'язано з тим, що моделюється процес формування в режимі вільної екструзії, тобто після виходу з головки обмежувальні стінки відсутні. Це видно з графіку на рисунку 3.16.

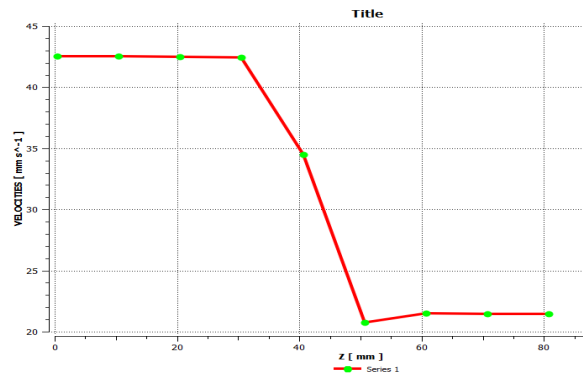


Рисунок 3.16 – Графік розподілу лінійної швидкості по довжині модельованої області

На рисунку 3.17 представлено контури поперечного перерізу круглого екструдату на різних відстанях від виходу з головки.

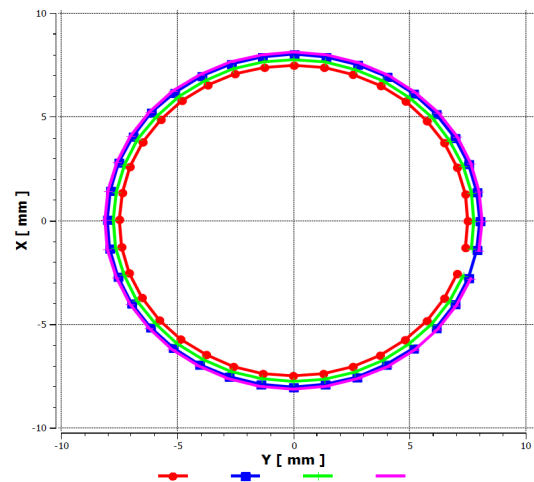


Рисунок 3.17 – Контури круглого екструдату в поперечному перерізі:
● – контур перерізу на виході з головки; ■ – контур перерізу на виході з головки через 2 мм; × – контур перерізу на виході з головки через 4 мм; – – контур стабілізованого перерізу розмірів екструдату

На рисунку 3.18 показаний графік розбухання в повздовжньому напрямі.

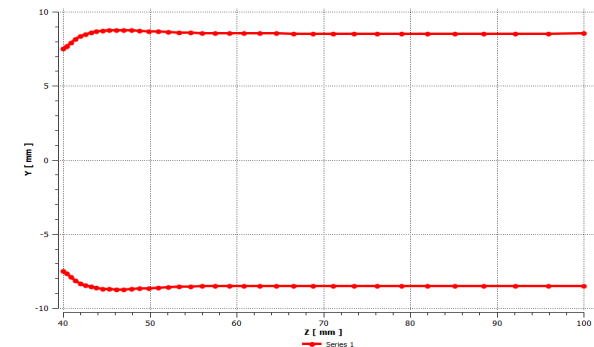


Рисунок 3.18 – Графік зміни форми круглого поперечного перерізу в повздовжньому напрямку

З графіку видно, що ефект розбухання проявляється до відстані в 4 мм від головки, після чого течія стабілізується.

Для оцінки зміни форми вільної поверхні показано результати досліджень зміни радіуса екструдованого профілю круглого поперечного перерізу, рисунок 3.19. Узагальнена залежність величини розбухання β для п'яти значень числа De на виході з формуючого каналу представлена на рисунку 3.20.

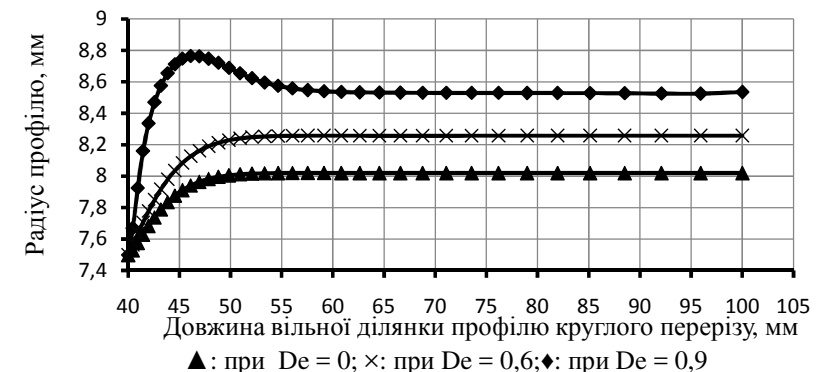


Рисунок 3.19 – Залежність зміни радіуса профілю круглого поперечного перерізу по довжині вільної ділянки екструдату

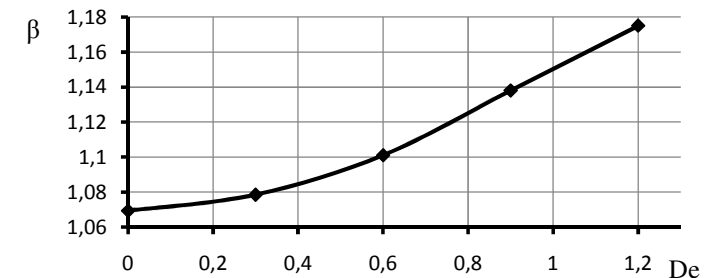


Рисунок 3.20 – Залежність величини розбухання β профілю круглого поперечного перерізу від числа De

У разі, коли пружні властивості рідини відсутні, число $De = 0$ і величина розбухання екструдованого профілю круглого поперечного перерізу складає 5,2 %. Із збільшенням числа Дебори розбухання профілю збільшується і при $De = 0,9$ становить 12,5 %, що значно перевершує значення розбухання потоку ньютонівської рідини. Це пояснюється тим, що перед виходом з формуючого інструмента екструдера неньютонівська рідина має розвинений профіль зсувної течії, а на виході характер розподілу швидкості по перетину поступово вирівнюється і, в кінцевому рахунку, екструдований профіль розбухає і рухається без всяких напружень на зовнішній поверхні.

3.1.3 Течія через формуючий канал прямокутного поперечного перерізу

Геометрія профілю представлена на рисунку 3.21, сітка – на рисунку 3.22. Область має довжину 0,1 м, де $L_{\text{гол}}=0,04$ м; $L_{\text{проф}}=0,06$ м, висота пластинки – 0,0002 м. Область розбита на 12000 скінченних елементів.

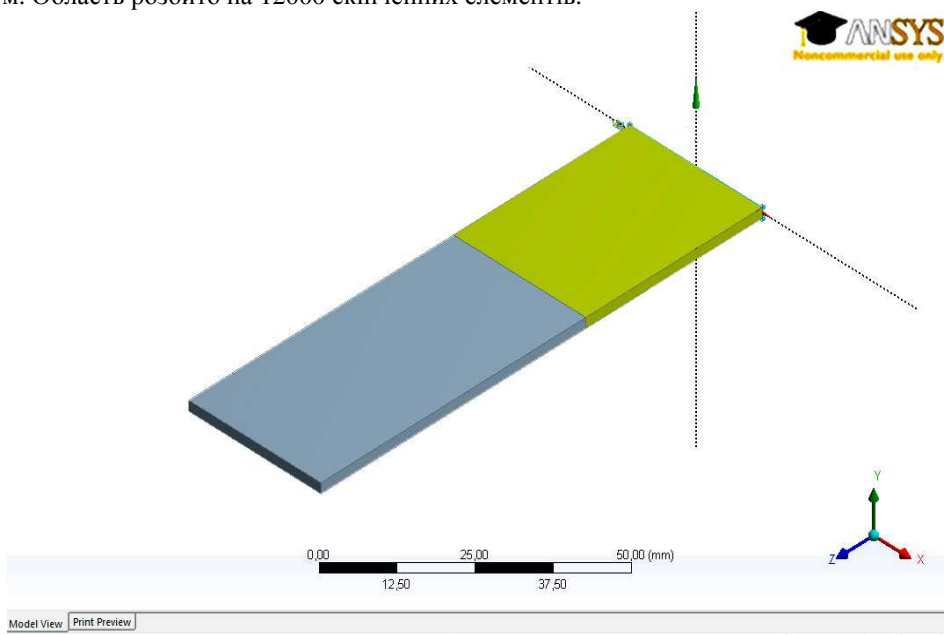


Рисунок 3.21 – Геометрія профілю прямокутного поперечного перерізу

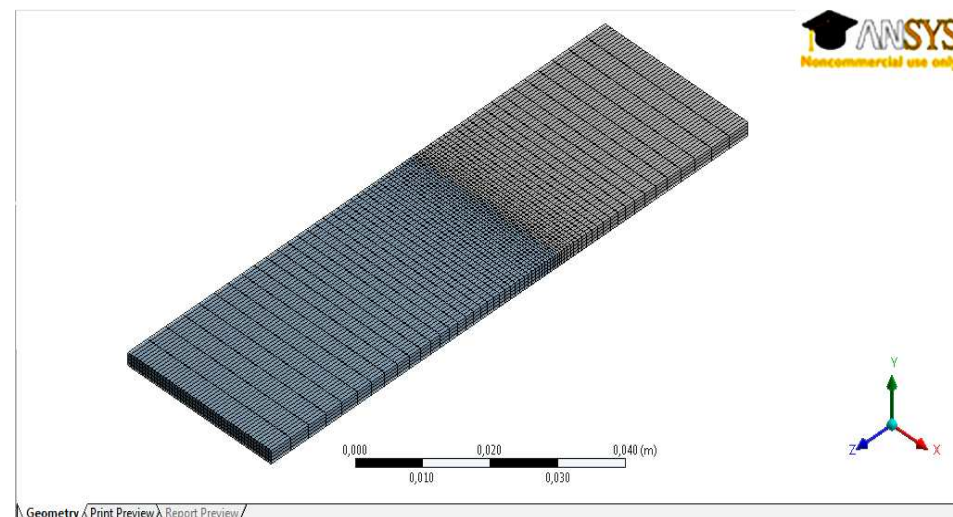


Рисунок 3.22 – Сітка для моделювання течії полімеру через прямокутний зазор

Область моделювання з граничними умовами представлена на рисунку 3.23.

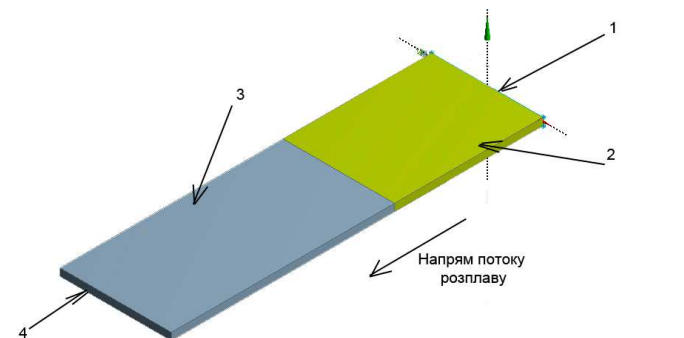


Рисунок 3.23 – Область геометрії профілю прямокутного поперечного перерізу з граничними умовами

1 – вхід (повністю розвинений потік розплаву); 2 – стінка (умова проковзування); 3 – вільна поверхня ($f_s = 0$, $f_n = 0$, $v_n = 0$); 4 – вихід ($f_n = 0$, $v_s = 0$)

На рисунку 3.24 представлено розподіл тиску по довжині головки, максимальне значення досягається при вході в головку і становить 6 МПа.

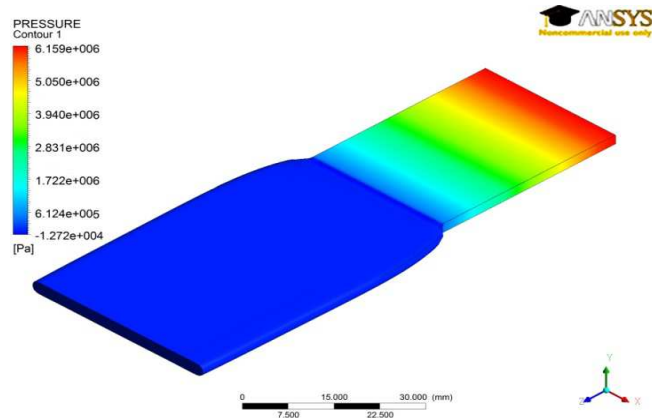


Рисунок 3.24 – Розподіл тиску по довжині головки

На рисунку 3.25-3.26 показаний розподіл швидкостей для геометрії типу «пластинка».

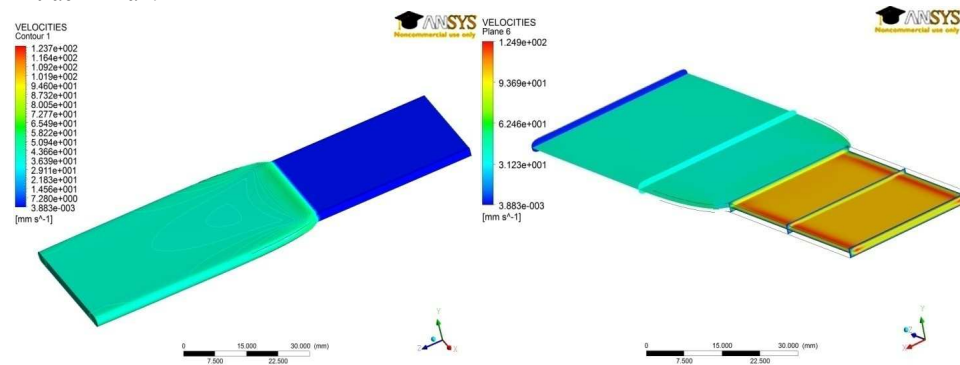


Рисунок 3.25 – Розподіл швидкостей для геометрії прямокутного поперечного перерізу

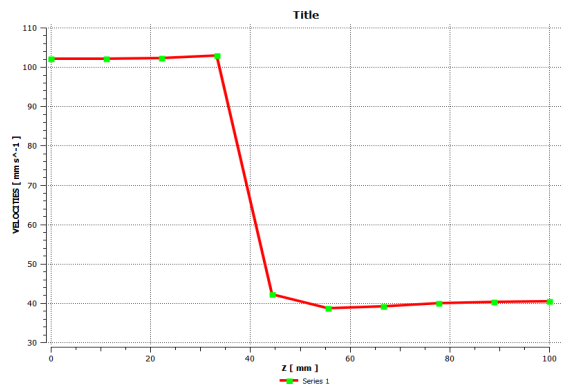


Рисунок 3.26 – Графік розподілу швидкостей для геометрії прямокутного поперечного перерізу

З рисунків 3.25-3.26 видно, що швидкість різко зменшується після виходу з формуючої головки і лінійно зменшується по довжині екструдованого профілю.

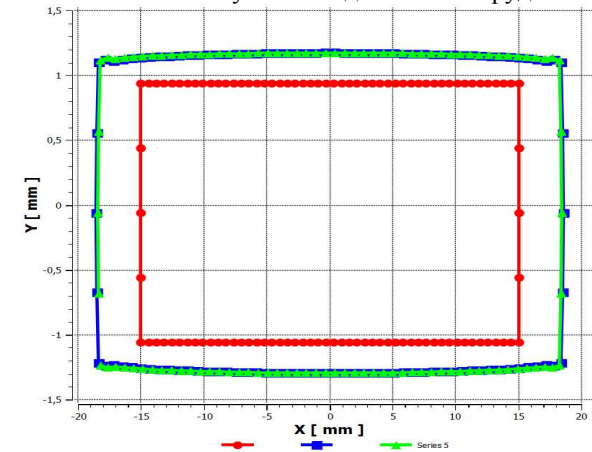


Рисунок 3.27 – Графік зміни форми профілю типу пластинка в поперечному напрямку
● – контур перерізу на виході з головки; ■ – геометрія екструдованого профілю з урахуванням ефекту розбухання через 25 мм відповідно; ▲ – контур стабілізованого перерізу розмірів екструдату

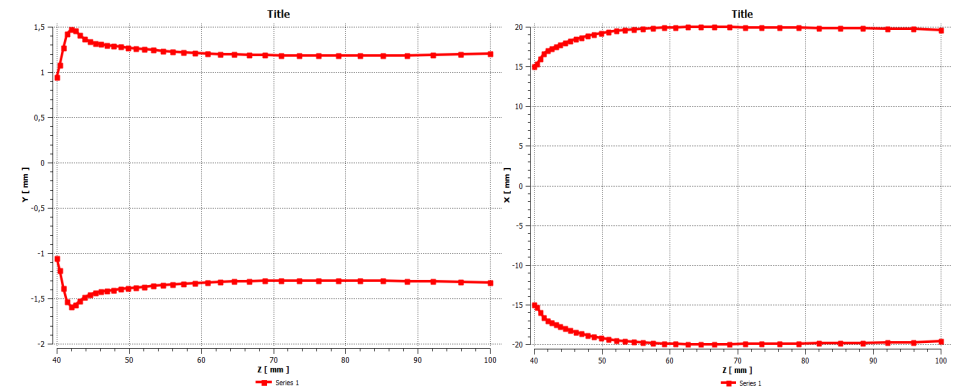
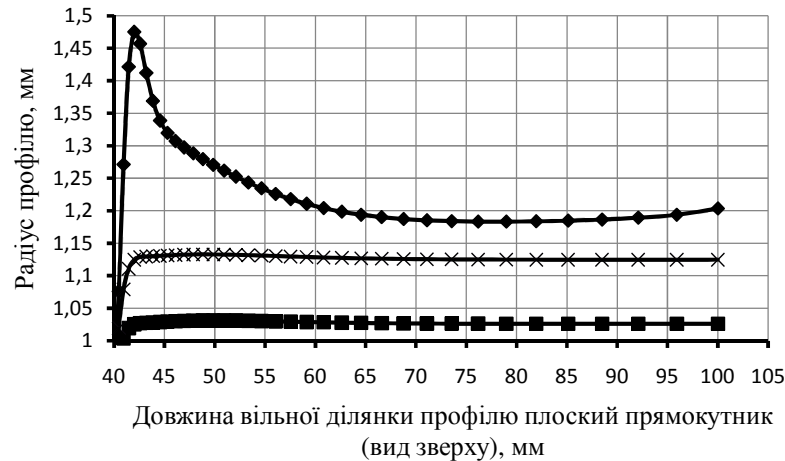
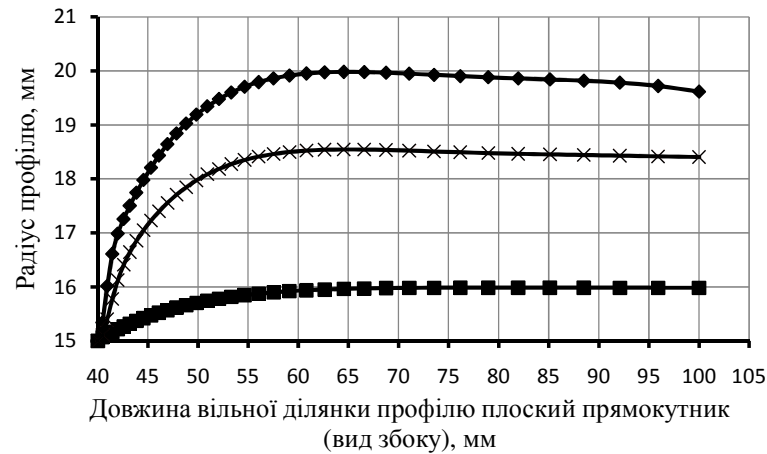


Рисунок 3.28 – Графік зміни форми типу пластинка в позаддовжньому напрямі (вигляд збоку та зверху відповідно)

Для оцінки зміни форми вільної поверхні показано результати досліджень зміни радіуса екструдованого профілю прямокутного поперечного перерізу, рисунок 3.29 (вигляд збоку та зверху відповідно). Узагальнена залежність величини розбухання β для п'яти значень числа De на виході з формуючого каналу представлена на рисунку 3.30



■: при $De = 0$; ×: при $De = 0,6$; ♦: при $De = 0,9$

Рисунок 3.29 – Залежність зміни радіуса профілю прямокутного поперечного перерізу по довжині вільної ділянки екструдату (вигляд збоку та зверху відповідно)

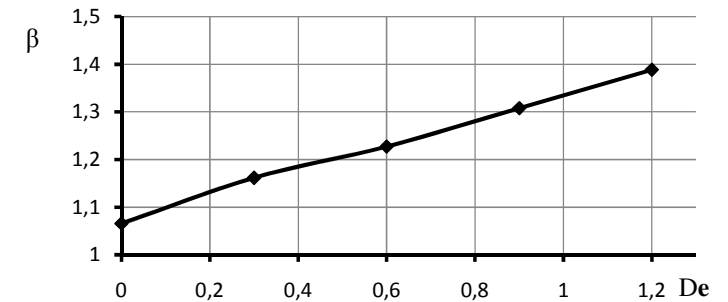


Рисунок 3.30 – Залежність величини розбухання β профілю прямокутного поперечного перерізу від числа De

У разі, коли пружні властивості рідини відсутні, число $De = 0$ і величина розбухання екструдованого прямокутного профілю складає 10 %, що відповідає експериментам Уайлла і Хілла [97]. Із збільшенням числа De розбухання профілю збільшується і при $De = 0,9$ воно становить 19,9 %, що значно перевершує значення розбухання потоку ньютонівської рідини. Це пояснюється тим, що перед виходом з формуючого інструмента екструдера неньютонівська рідина має розвинений профіль зсувної течії, а на виході характер розподілу швидкості по перетину поступово вирівнюється і, в кінцевому рахунку, екструдований профіль розбухає і рухається без всяких напруження на зовнішній поверхні.

З графіку видно, що при підвищенні швидкості екструзії коефіцієнт розбухання профілю зростає.

3.1.4 Моделювання течії розплаву через канал для формування порожнистого профілю квадратного поперечного перерізу

Геометричні розміри профілю: квадратний профіль $0,04 \text{ м} \times 0,04 \text{ м}$, товщина стінки $0,002 \text{ м}$, довжина головки $L_{\text{гол}} = 0,03 \text{ м}$; $L_{\text{проф}} = 0,05 \text{ м}$. Геометрія представлена на рисунку 3.31.

Була побудована сіткова область, в якій було виконано згущення сітки на межі головка-екструдат, оскільки нас цікавить саме ця область через проходження в ній перехідних процесів. Отримана сітка представлена на рисунку 3.29.

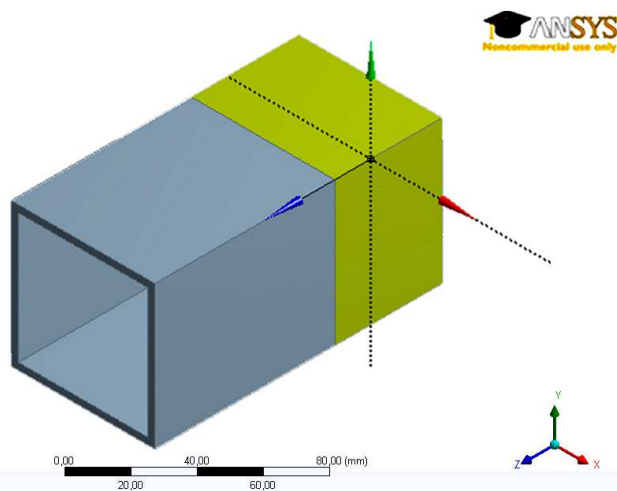


Рисунок 3.31 – Геометрія порожнистого профілю квадратного поперечного перерізу

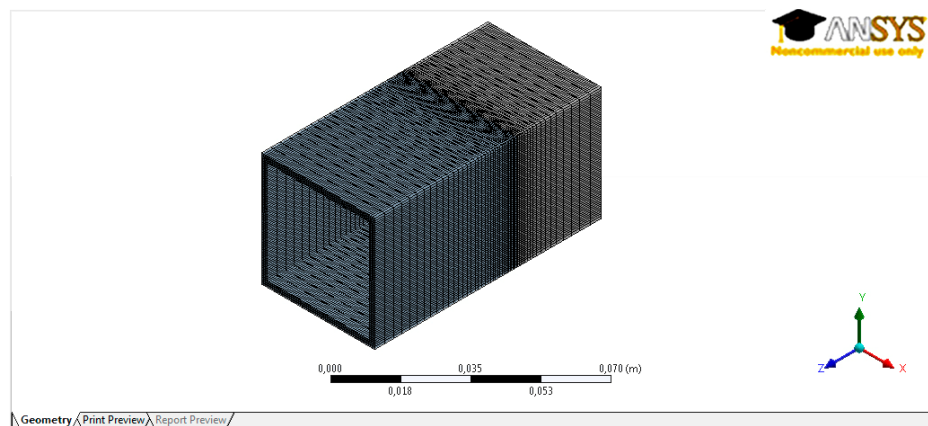


Рисунок 3.32 – Скінченно-елементна сітка для порожнистого профілю квадратного поперечного перерізу

Область моделювання з граничними умовами представлена на рисунку 3.33.

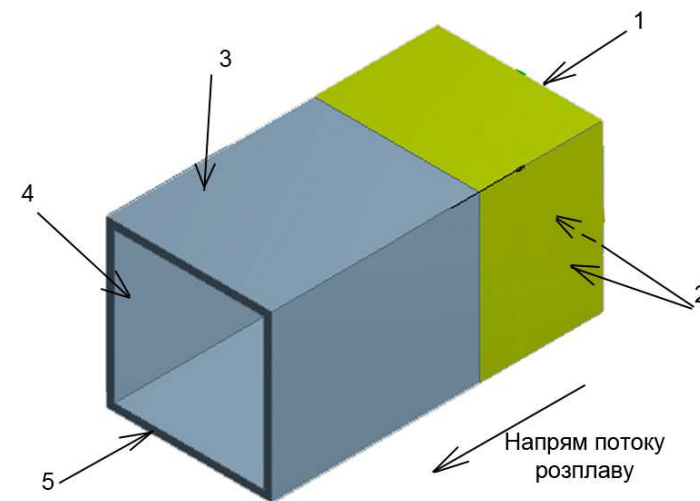
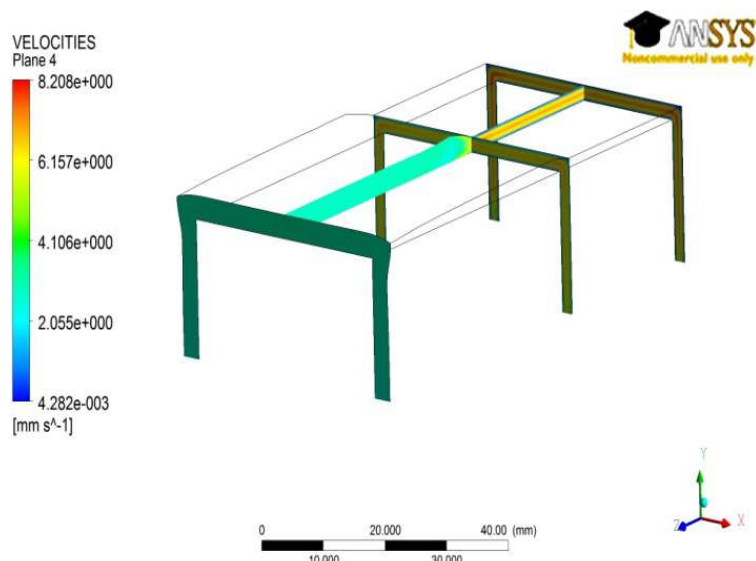


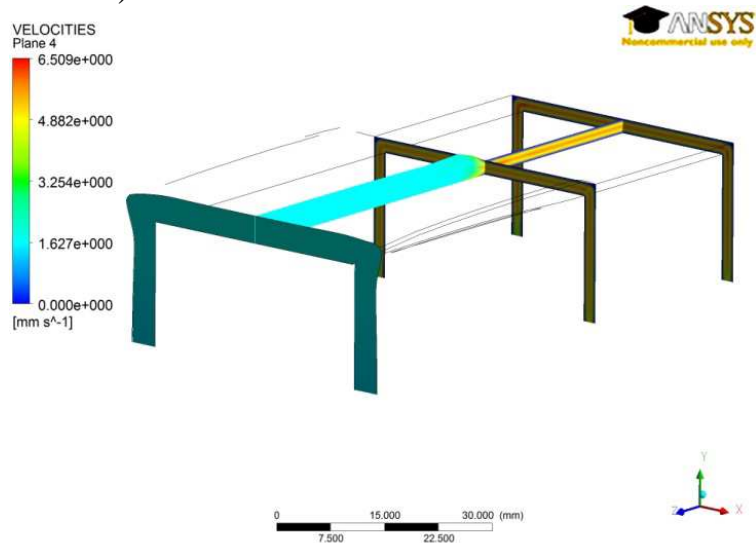
Рисунок 3.33 – Область геометрії порожнистого профілю квадратного поперечного перерізу з граничними умовами

1. вхід (повністю розвинений потік розплаву); 2. стінка (умова проковзування);
3. вільна поверхня ($f_s = 0$, $f_n = 0$, $v_n = 0$); 4. симетрія ($v_n = 0$, $f_s = 0$);
5. вихід ($f_n = 0$, $v_s = 0$)

Розраховане поле швидкостей представлено на рисунку 3.34 для випадку проковзування і повного прилипання відповідно. З підвищенням коефіцієнту тертя швидкість руху полімеру в головці знижується. Максимальні значення досягаються на виході з формуючого отвору на кутах, де утворюються так звані «застійні зони».



a)



б)

Рисунок 3.34 – Профілі швидкостей при різних значеннях коефіцієнту тертя
а – при $k=10000$; б – $k=100000$

Для визначення умови проковзування полімеру в каналі формуючого інструменту використовували залежність [98].

Графік розподілу швидкості екструдату після виходу з головки показано на рисунку 3.35.

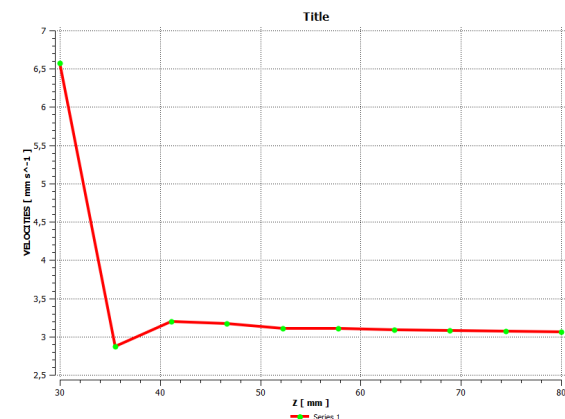


Рисунок 3.35 – Графік розподілу швидкості порожнього профілю квадратного поперечного перерізу по довжині модельованої області

Вигляд графіку на рисунку 3.35 подібний до оберненої залежності зміни перерізу екструдату по довжині. Швидкість поступово зменшується після виходу з формуючого отвору.

В той же час, за наявності пристінного проковзування швидкість розплаву по довжині каналу дещо зростає.

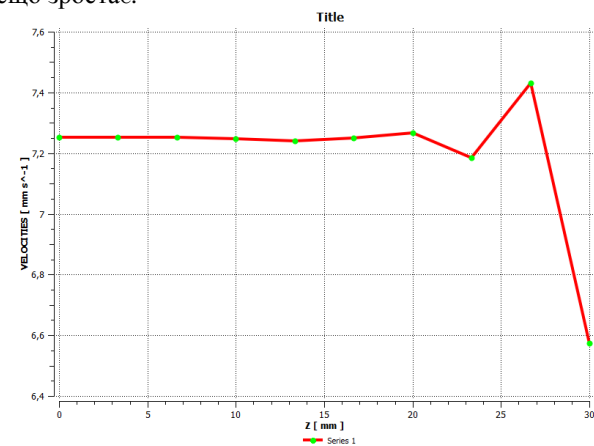
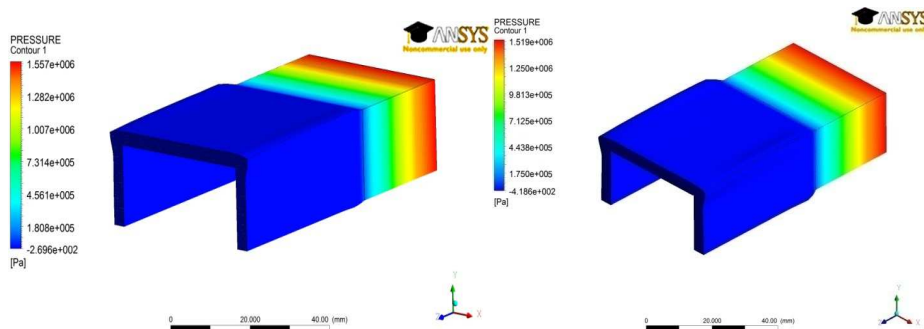


Рисунок 3.36 – Розподіл швидкості порожнього профілю квадратного поперечного перерізу в головці

На рисунку 3.36 видно, що урахуванням тертя матеріалу по стінках по довжині швидкість збільшується на 0,5 %.

Розглянемо розрахунки тиску для модельованої області з урахуванням проковзування і без проковзування відповідно (рисунки 37 а, б).



а) б)
Рисунок 3.37 – Розподіл тиску порожнистого профілю квадратного поперечного перерізу з урахуванням проковзування і без урахування
а – $k=10000$; б – $k=100000$

На рисунку 3.37 представлені графіки розподілу тиску при різних коефіцієнтах тертя $k=10000$, $k=100000$ і максимальне значення становить $1,6 \cdot \text{МПа}$, та $1,5 \text{ МПа}$ відповідно.

На рисунку 3.38 представлено контури перерізу екструдату на різних відстанях від виходу з головки.

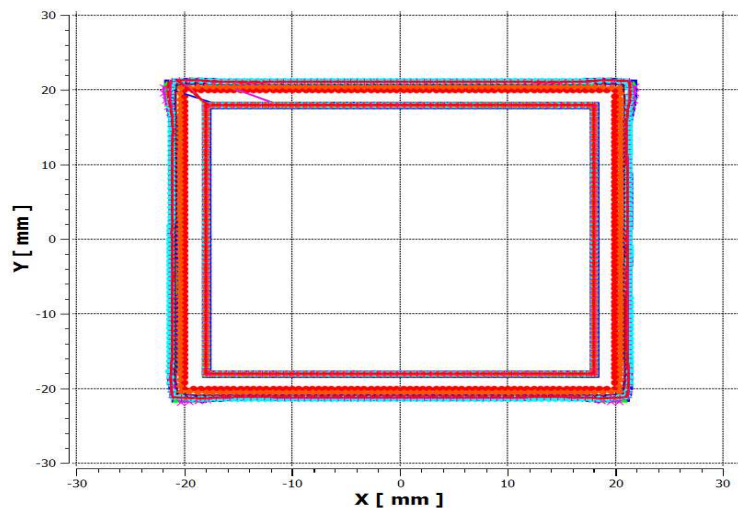


Рисунок 3.38– Контури порожнистого профілю в поперечному перерізі
● – контур перерізу на виході з головки; ■ – контур перерізу через 30 мм після виходу з головки;
▲ – контур перерізу через 40 мм після виходу з головки; × – контур стабілізованого перерізу розмірів екструдату; l – контур перерізу через 3 мм після виходу з головки; 0 – контур перерізу через 5 мм після виходу з головки; ♦ – контур перерізу через 1,5 мм після виходу з головки;
+ – контур перерізу через 10 мм після виходу з головки; -- – контур перерізу через 20 мм після виходу з головки

На рисунку 3.39 представлено графік зміни форми профілю по довжині екструдованого виробу.

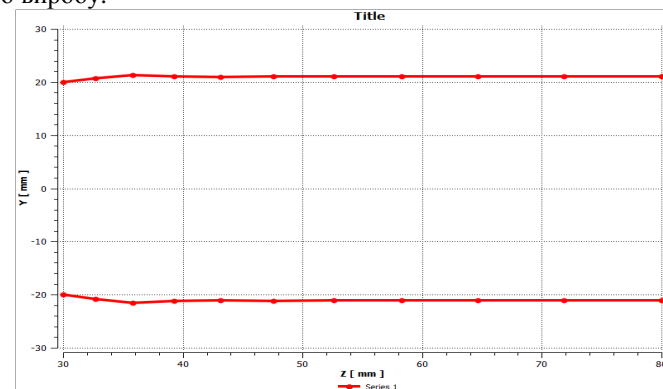
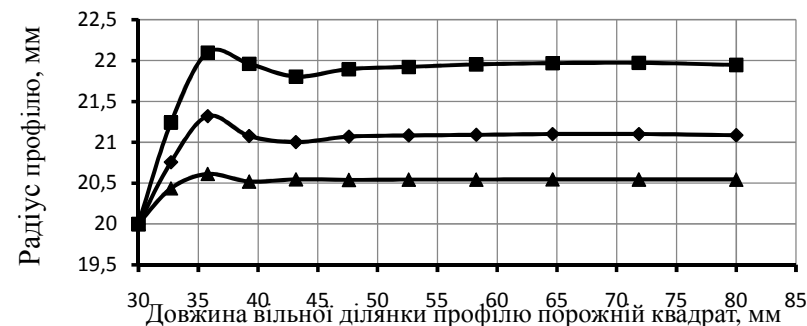


Рисунок 3.39 – Графік форми в повздовжньому напрямі

Для оцінки зміни форми вільної поверхні показано результати досліджень зміни радіуса екструдованого профілю квадратного поперечного перерізу, рисунок 3.40. Узагальнена залежність величини розбухання β для п'яти значень числа De на виході з формуючого каналу представлена на рисунку 3.41 (вигляд збоку та зверху відповідно).



▲ : при $De = 0$; ♦: при $De = 0,6$; ■: при $De = 0,9$

Рисунок 3.40 – Залежність зміни радіуса профілю квадратного поперечного перерізу по довжині вільної ділянки екструдату

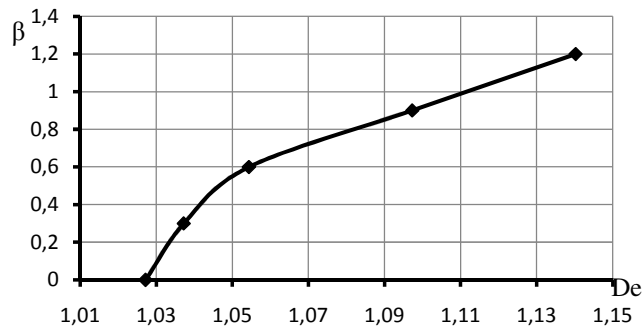


Рисунок 3.41 – Залежність величини розбухання β профілю квадратного поперечного перерізу від числа De

У разі, коли пружні властивості рідини відсутні, число $De = 0$ і величина розбухання екструдованого квадратного профілю складає 6,1 %. Із збільшенням числа De розбухання профілю збільшується і при $De = 0,9$ воно становить 22 %, що значно перевершує значення розбухання потоку ньютонівської рідини. Це пояснюється тим, що перед виходом з формуючого інструмента екструдера неньютонівська рідина має розвинений профіль зсувної течії, а на виході характер розподілу швидкості по перетину поступово вирівнюється і, в кінцевому рахунку, екструдований профіль розбухає і рухається без всяких напружень на зовнішній поверхні.

3.2 Числовий експеримент процесу формування профільних погонажних виробів

Даний експеримент присвячений моделюванню тривимірного потоку неньютонівської рідини, яка протікає через екструзійну головку. Процес проектування починається із задавання форми виробу. Виріб являє собою Ш-подібний профіль (рисунок 3.42) прямокутного перерізу $20 \text{ мм} \times 10 \text{ мм}$ з внутрішнім ребром товщиною 2 мм. Розглядається тільки вихідна ділянка формуючого каналу, яка є однією з найбільш важливих елементів у процесі екструзії, так як вона повинна компенсувати деформації екструдату після виходу з головки до досягнення заданої форми [9].

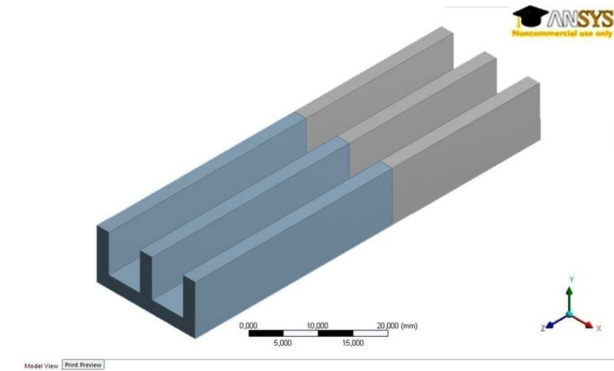


Рисунок 3.42 – Геометрична модель профілю при течії через Ш-подібний канал експериментальної головки

Геометричні розміри профілю: $20 \text{ мм} \times 10 \text{ мм}$, довжина головки $L_{\text{гол}} = 0,3 \text{ м}$; довжина вільного кінця $L_{\text{проф}} = 0,4 \text{ м}$.

Задавалась марка матеріалу, робоча температура та граничні умови. Вид навантаження в даному випадку – швидкість руху рідини на вході в головку $U_{\text{сер}}$, яке визначали як

$$U_{\text{сер}} = \frac{Q}{f_{\text{ВХ}}}. \quad (3.1)$$

де Q – задана продуктивність, $\text{м}^3/\text{с}$; f – площа вхідного перерізу, м^2 .

В кінцевому результаті була отримана розрахункова модель каналу, готова для обчислення, її загальний вигляд зображено на рисунку 3.43. Мінімальна необхідна кількість вузлів вибиралась з умови мінімальних змін (до 1 %) розподілу швидкостей на виході та відсутності нерівномірності швидкостей між елементами.

Для розрахунків методом скінчених елементів була побудована сіткова область з 33408 елементів. Було використане згущення сітки на межі головки-екструдат, оскільки об'єктом досліджень є саме ця область через проходження в ній перехідних процесів.

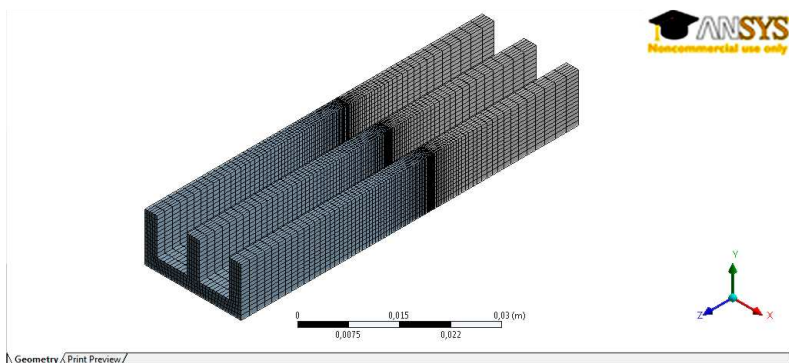


Рисунок 3.43 – Вихідна ділянка формуючого каналу головки Ш-подібної форми та вільна ділянка профілю з нанесеною розрахунковою сіткою скінченних елементів

Область моделювання з граничними умовами представлена на рисунку 3.44.

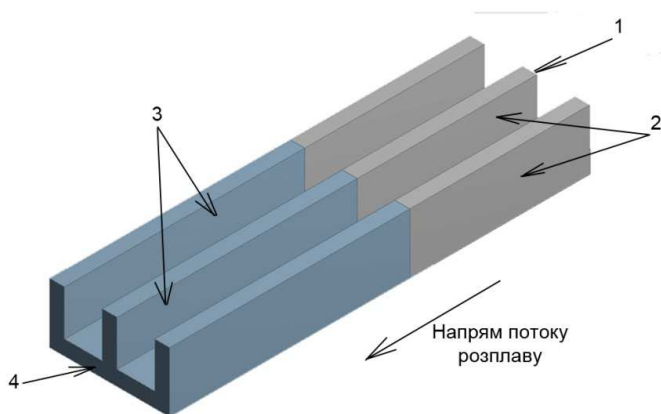


Рисунок 3.44 – Область геометрії профілю Ш-подібної форми з граничними умовами
1. вхід (повністю розвинений потік розплаву); 2. стінка (умова проковзування);
3. вільна поверхня ($f_s = 0$, $f_n = 0$, $v_n = 0$); 4. вихід ($f_n = 0$, $v_s = 0$)

Розглянемо результати моделювання (рисунки 3.45-3.52).

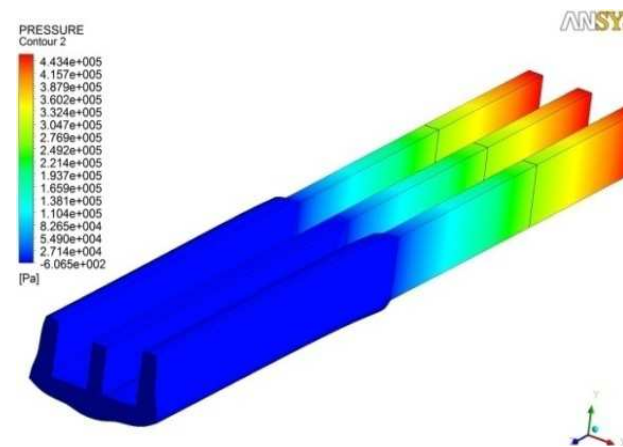


Рисунок 3.45 – Результати розрахунку тиску Ш-подібної форми

Максимальне значення тиску дорівнює 4,434·Па, яке досягається на вході в екструзійну головку.

Розглянемо контури розподілу швидкостей в Ш-подібному зазорі, що представлено на рисунку 3.46.

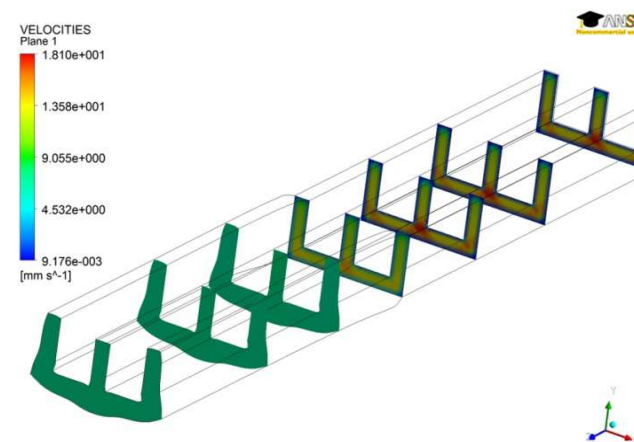


Рисунок 3.46 – Контури розподілу поля швидкостей Ш-подібної форми

На наведеному рисунку спостерігається поступове зменшення швидкостей внаслідок їх перебудови в поперечному напрямі, досягаючи постійного значення на деякій відстані від головки. Сумарний об'єм речовини при цьому зберігається.

Максимальне значення швидкості досягається при вході в головку, а при виході з головки швидкість руху полімеру різко знижується, що пов'язано з тим, що моделюється процес формування в режимі вільної екструзії, тобто після виходу з головки обмежувальні стінки відсутні. Це видно з графіку на рисунку 3.47.

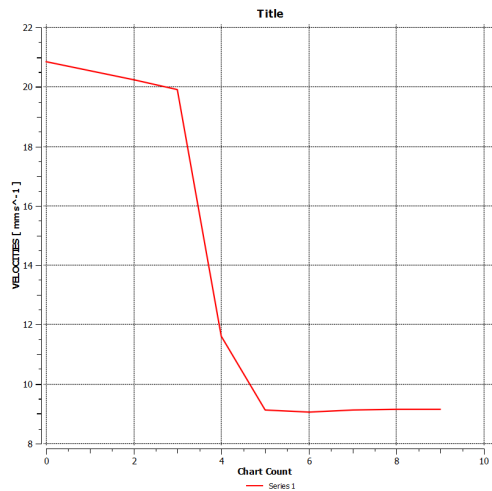


Рисунок 3.47 – Графік розподілу лінійної швидкості по довжині модельованої області Ш-подібної форми

На рисунку 3.48 представлено контури перерізу екструдату на різних відстанях від виходу з головки. Результати числових досліджень показують, що в разі виконання формуючих каналів з геометрією, яка відповідає заданому перерізу екструдованих профілів, дійсний переріз може значно відрізнятись від цільового.

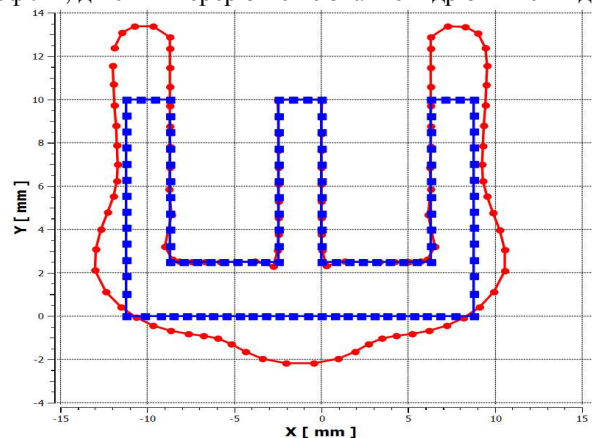


Рисунок 3.48 – Контури поперечних перерізів профілю на виході з формуючого каналу головки і стабілізованих розмірів екструдату Ш-подібної форми
■ – контур перерізу на виході з головки; ● – контур стабілізації перерізу екструдату

На рисунку 3.46 показаний графік розбухання в повздовжньому напрямі.

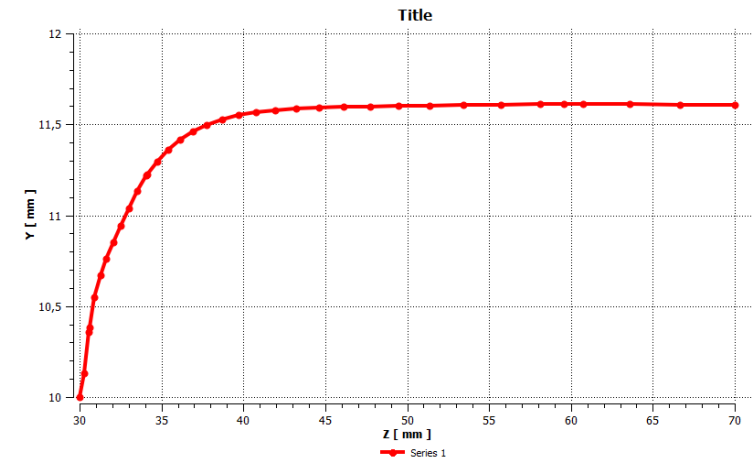


Рисунок 3.49 – Графік зміни форми екструдату Ш-подібної форми в повздовжньому напрямку

Як видно з графіку на рисунку 3.49, через 45 мм після виходу з головки течія стабілізується, розбухання складає 40%.

Розглянемо графіки розподілу швидкостей зсуву та лінійних швидкостей руху екструдату по довжині досліджуваної області. Вони представлені на рисунках 3.50 та 3.51.

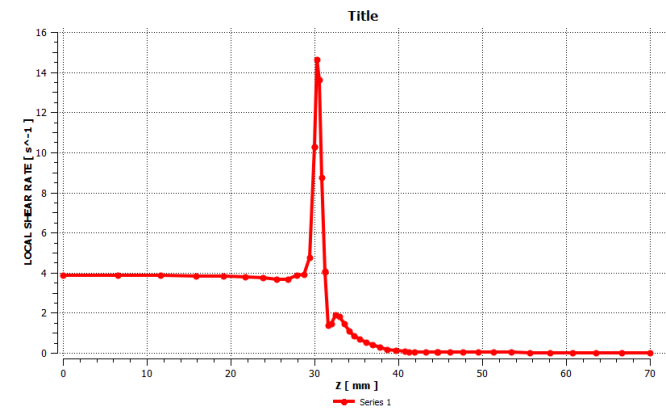


Рисунок 3.50 – Розподіл швидкостей зсуву по довжині формуючого каналу і вільної поверхні Ш-подібної форми

На рисунку 3.51 представлений розподіл швидкості зсуву по довжині моделі, максимальне значення досягається через деяку відстань після виходу з екструзійної головки, тобто з певним запізненням, що пов'язано з явищем релаксації. Коефіцієнт тертя в даному випадку прийнято $k=10000$.

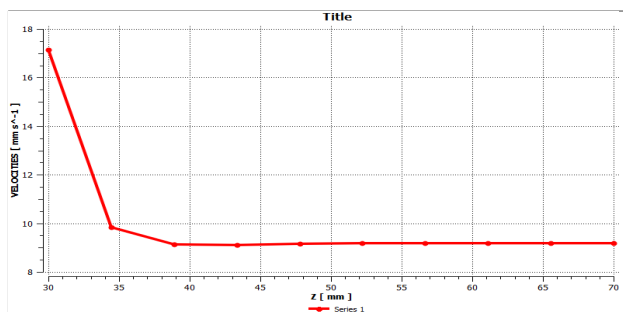


Рис. 3.51 – Розподіл лінійних швидкостей по довжині вільної ділянки екструдату Ш-подібної форми

На наведеному графіку спостерігається поступове зменшення швидкостей внаслідок їх перебудови в поперечному напрямі, досягаючи постійного значення на деякій відстані від головки. Сумарний об'єм речовини при цьому зберігається.

Таким чином, врахування пружних властивостей рідини при моделюванні течії з використанням моделі ФТТ показує зростання стрибків тиску і напружень в області виходу з формуючого інструменту екструдера, а також дозволяє визначити межі області перебудови екструдованого профілю і здійснювати обґрунтований вибір параметрів формуючого інструменту.

Досліджено залежності швидкості екструзії від коефіцієнту тертя полімеру по стінці каналу. Для визначення умов проковзування полімеру в каналі формуючого інструменту використана залежність (2.2).

При врахуванні умови проковзування екструдату на стінці формуючого каналу спостерігається підсумкове розширення потоку на 16%, на ділянці $z = 0 \dots 1$ за умов прилипання екструдату (швидкість течії матеріалу на стінці формуючого інструменту дорівнює нулю), підсумкове розбухання потоку на даній ділянці збільшується до 23 %.

Результати проведених числових експериментів залежності коефіцієнту розбухання від коефіцієнту тертя представлені на рисунку 3.52.

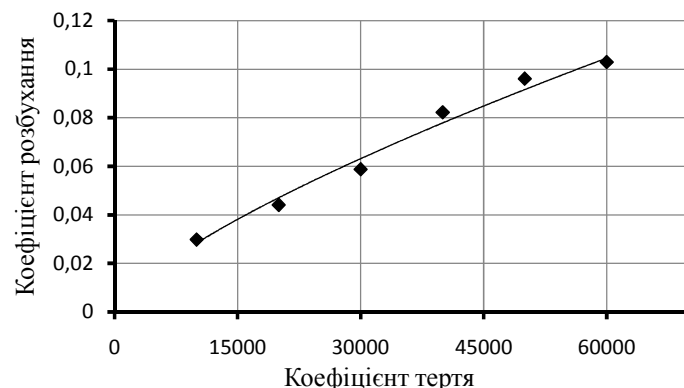


Рис. 3.52 – Залежність зміни коефіцієнту розбухання від коефіцієнту тертя

З графіку на рисунку 3.52 видно, що при збільшенні коефіцієнту тертя явище розбухання полімерного профілю збільшується, ми отримуємо практично лінійну залежність.

Уздовж осі симетрії екструдованого профілю як для ньютонівської, так і для в'язкопружної рідини, перепад тиску в них на виході з формуючого отвору монотонно зменшується до нуля, тоді як на поверхні екструдованого профілю на виході тиск різко змінюється і приймає негативні значення на ділянці з $z = 0 \dots 1$. Причому зі збільшенням пружних властивостей рідини, перепад тиску на поверхні екструдованого профілю на цій ділянці збільшується.

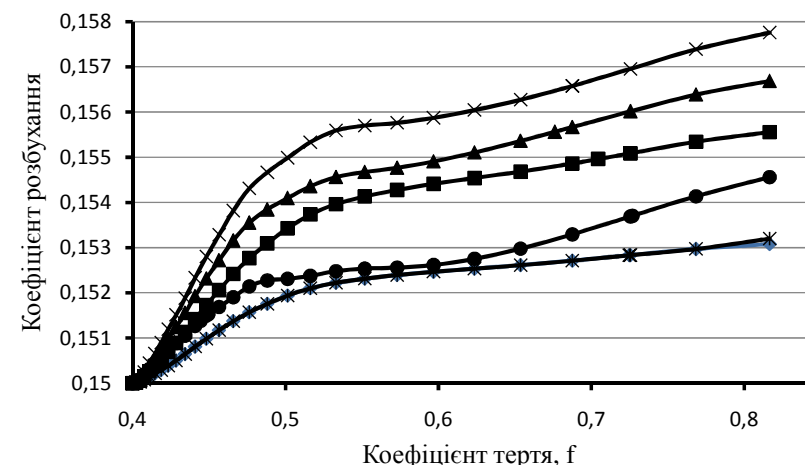


Рис. 3.53 – Залежність зміни коефіцієнту розбухання від коефіцієнту тертя при постійній швидкості екструзії
 ♦ – $f = 10000$; ■ – $f = 50000$; ▲ – $f = 75000$; × – $f = 100000$; ∞ – $f = 200000$;
 ● – $f = 40000$

З графіку можна зробити висновок, що зі зменшенням коефіцієнту тертя в головці течія екструдату після виходу з неї поводить себе більш стабільно, тобто менше проявляється ефект розбухання (з 5,3 % до 2 %).

Було проведено моделювання течії при різних значеннях лінійної швидкості розплаву на вході в головку.

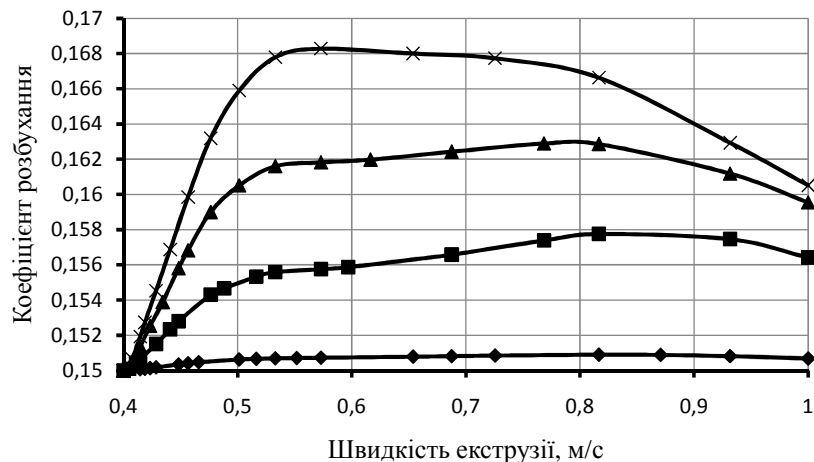


Рисунок 3.54 – Графік залежності коефіцієнту розбухання від швидкості екструзії
 ♦ – $V=0,01$ м/с; ■ – $V=0,02$ м/с; ▲ – $V=0,04$ м/с; × – $V=0,08$ м/с

З рисунку 3.54 витікає, що зі збільшенням лінійної швидкості розплаву ефект розбухання збільшується.

Розглянемо результати моделювання Ш-подібного профілю з довжиною формуючого каналу, рекомендованого при конструюванні профільних погонажних головок, довжина каналу повинна в 10 разів бути більшою за товщину стінок виробу (рисунок 3.55). На рисунку 3.55 представлені результати розрахунку тиску, швидкості і контури перерізу екструдату в поперечному перерізі на виході з головки і в кінці екструдату.

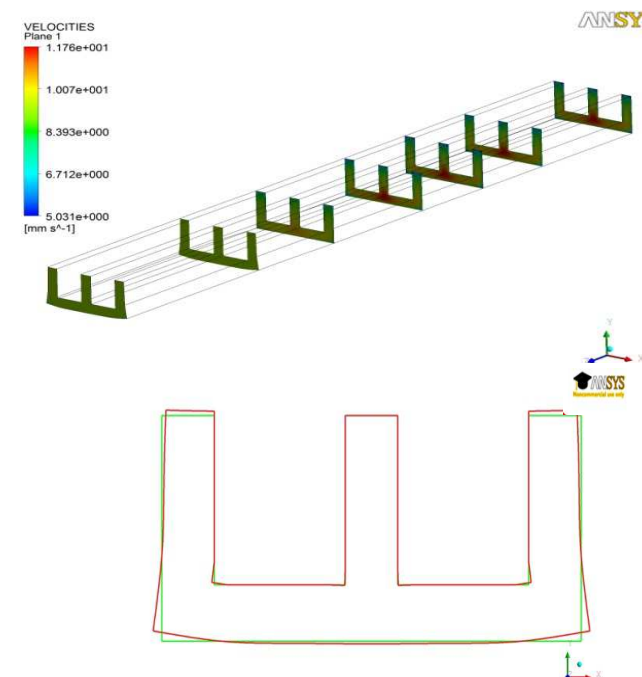
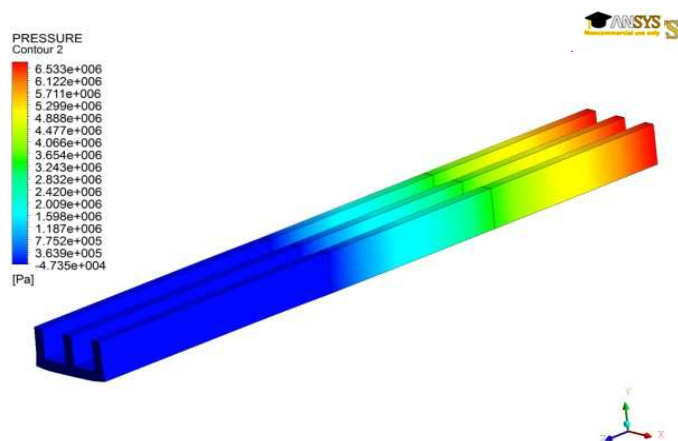


Рисунок 3.55 – Результати розрахунку тиску, швидкості і контури перерізу в поперечному перерізі на виході з формуючого каналу і стабілізації розмірів екструдату

Максимальне значення тиску дорівнює 6,5 МПа, яке досягається на вході в екструзійну головку перевищує значення тиску при меншій довжині формуючого каналу.

Зазвичай, довжину вихідного формуючого каналу обирають з міркувань мінімізації ефекту розбухання, при цьому її довжина, а отже і гідравлічний опір є досить великими. Зі зменшенням довжини формуючих каналів явище розбухання стає більш значним – форма екструдату спотворюється. Для досягнення заданої форми екструдату зі зменшенням довжини формуючого каналу необхідно компенсувати явище розбухання. Це дозволить зменшити перепад тиску в головці на 10-12 %, а відповідно енергетичні витрати на процес формування профільних погонажних виробів

Аналогічно до дослідження Ш-подібного зразка профільної погонажної головки, досліджувався зразок головки форми рамка. Для проведення числових досліджень була побудована тривимірна геометрична модель в пакеті SolidWorks у формі каналів головки, що досліджувалась (рисунок 3.56), а потім вона розбивалась на фрагменти за допомогою графічного інтерфейсу системи ANSYS Polyflow, задавались граничні умови.

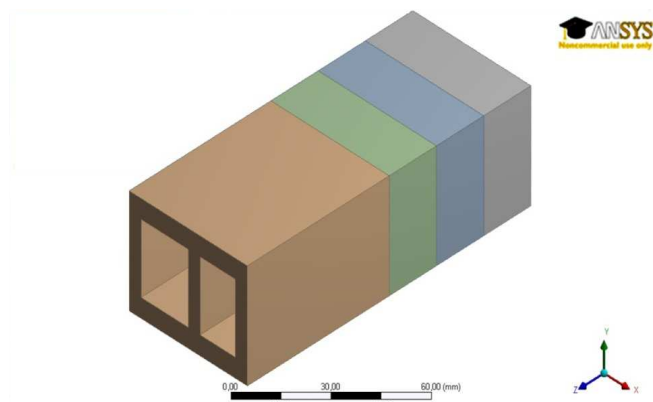


Рисунок 3.56 – Геометрична модель профілю при течії через канал форми рамка

Геометричні розміри профілю: 50 мм × 40 мм, довжина головки $L_{\text{гол}}=0,5$ м; довжина вільного кінця $L_{\text{проф}}=0,5$ м.

В кінцевому результаті була отримана розрахункова модель каналу, готова для обчислення, її загальний вигляд зображено на рисунку 3.57. Обґрунтованість вибору сітки визначалась по зміні картини витрати на виході. Мінімальна необхідна кількість вузлів вибиралась з умови мінімальних змін (до 1 %) розподілу швидкостей на виході та відсутності нерівномірності швидкостей між елементами. Для розрахунків методом скінчених елементів була побудована сіткова область з 22408 елементів. Було використане згущення сітки на межі головка-екструдат, оскільки нас цікавить саме ця область через проходження в ній перехідних процесів.

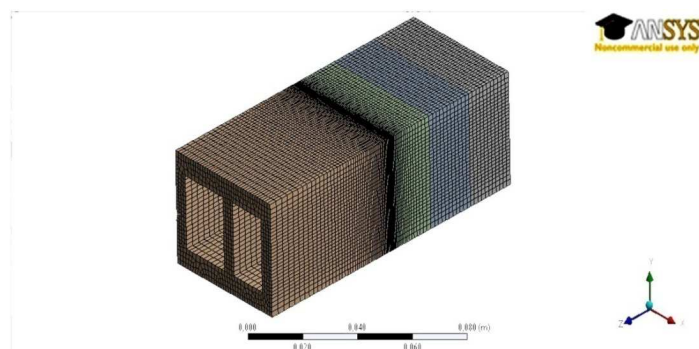


Рисунок 3.57– Канал головки форми рамка з нанесеною розрахунковою сіткою скінчених елементів

Область моделювання з граничними умовами представлена на рисунку 3.58.

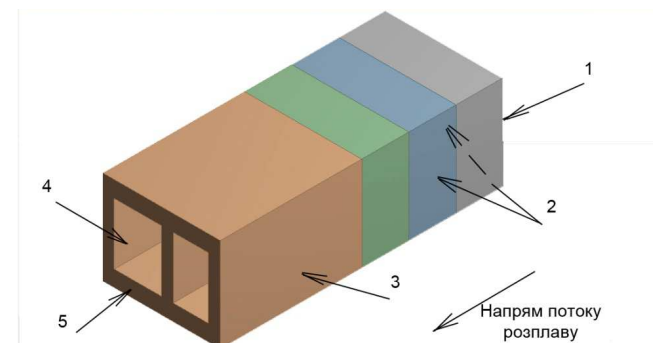


Рисунок 3.58 – Область геометрії профілю форми рамка з граничними умовами
1 – вхід (повністю розвинений потік розплаву); 2– стінка (умова проковзування);
3–вільна поверхня ($f_s = 0$, $f_n = 0$, $v_n = 0$); 4–симетрія ($v_n = 0$, $f_s = 0$);
5– вихід ($f_n = 0$, $v_s = 0$)

Розглянемо результати моделювання (рисунки 3.59-3.63).

Максимальне значення тиску дорівнює 3,8·МПа, яке досягається на вході в екструзійну головку, рисунок 3.59.

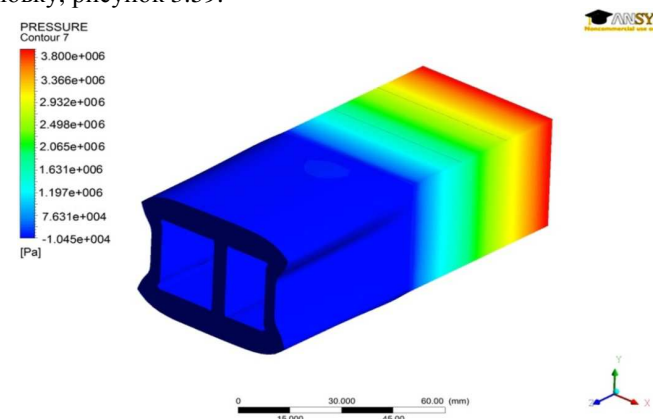


Рисунок 3.59 – Результати розрахунку тиску профілю форми рамка

Розглянемо поле розподілу швидкостей в формуючому каналі, рисунок 3.60.

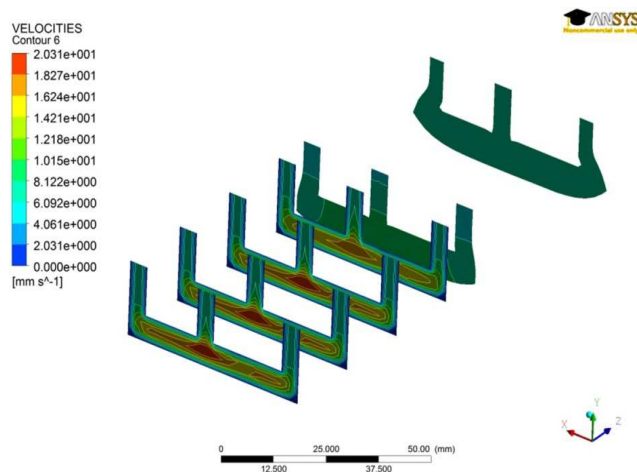


Рисунок 3.60 – Контури розподілу швидкостей форми рамка

На наведеному графіку спостерігається поступове зменшення швидкостей внаслідок їх перебудови в поперечному напрямі, досягаючи постійного значення на деякій відстані від головки. Сумарний об'єм речовини при цьому зберігається.

Максимальне значення швидкості досягається при вході в головку, а при виході з головки швидкість руху полімеру різко знижується, що пов'язано з тим, що моделюється процес формування в режимі вільної екструзії, тобто після виходу з головки обмежувальні стінки відсутні. Це видно з графіку на рисунку 3.61.

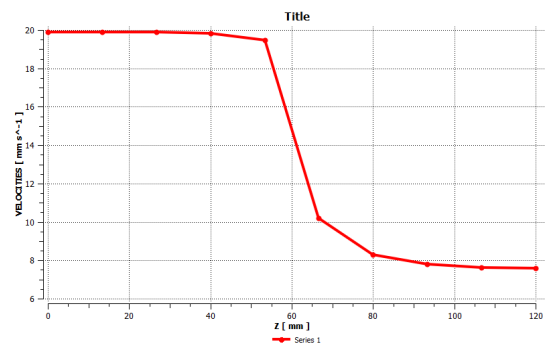


Рисунок 3.61 – Графік розподілу лінійної швидкості по довжині модельованої області профілю форми рамка

На рисунку 3.62 представлено контури перерізу екструдату на різних відстанях від виходу з головки.

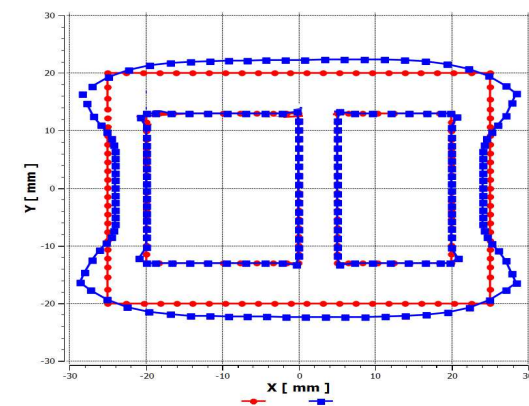


Рисунок 3.62 – Контури поперечних перерізів профілю на виході з формуючого каналу головки і стабілізованих розмірів екструдату форми рамка
 • – контур перерізу на виході з головки; ■ – контур перерізу стабілізації розмірів екструдату

На рисунку 3.63 показаний графік розбухання профілю форми рамка в повздовжньому напрямі.

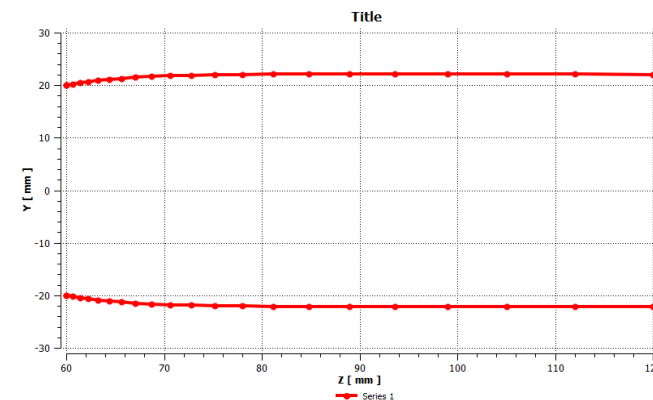


Рисунок 3.63 – Графік зміни форми рамка в повздовжньому напрямку

З графіку видно, що ефект розбухання проявляється до відстані в 10 мм.

Таким чином, врахування пружних властивостей рідини при моделюванні течії з використанням моделі ФТТ показує зростання стрибків тиску і напружень в області виходу з формуючого інструменту екструдера, а також дозволяє визначити межі області перебудови екструдованого профілю і здійснювати обґрунтований вибір параметрів формуючого інструменту.

Показано, що використання моделі ФТТ при моделюванні течії в'язкопружних рідин на виході з формуючого інструменту екструдера дозволяє розрахувати зміну перерізу екструдованого погонажного виробу.

3.3 Моделювання і числовий алгоритм обереного проектування формуючого каналу профільних головок

Основним інструментом, що задає кінцеву форму екструдованих погонажних виробів, є екструзійна головка. Завдання моделювання полягає в розкритті можливостей уточненого проектування геометрії, за допомогою числового моделювання, формуючих каналів в екструзійних головках для виробництва пластикових профілів. Метою моделювання є визначення форми каналу головки, що приводить до збалансованої витрати на виході з головки, яка відповідає умовам отримання заданого виробу. Можливість модифікування форми каналу з використанням алгоритму оптимізації дозволяє проводити розрахунок геометрії формуючих каналів головок по заданих розмірах екструдованих виробів

Процес проектування починається із задавання форми виробу. Заданий виріб представляє собою двокамерний полий профіль (рисунок 3.64а) прямокутного перерізу 40 мм × 50 мм з внутрішнім ребром товщиною 5 мм. Так як головка симетрична, моделюється тільки половина формуючого каналу, як показано на рисунку 3.64б.

Розглядається тільки профіль формуючого каналу, який є одним з найбільш важливих елементів у процесі екструзії, так як він повинен компенсувати деформації екструдату після виходу з головки до досягнення заданої форми [9]. Формуючий канал розділений на чотири підобласті (як показано на рисунку 3.64б) для застосування конкретних алгоритмів для перебудови сітки в кожній підобласті при моделюванні профілю головки. Підобласті 1, 2 і 3 представляють собою канал головки де протікає розплав, в той час як підобласть 4 представляє екструдат, який знаходиться в контакті з повітрям.

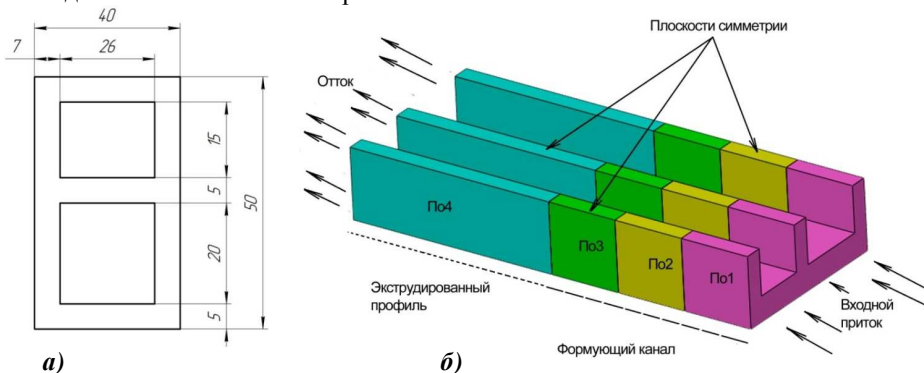


Рисунок 3.64 – Модель двокамерного полого профілю прямокутного поперечного перерізу
а) поперечний переріз екструдованого профілю; б) схема розбивки формуючого каналу головки і вільної ділянки екструдату

Геометрія формуючого каналу головки визначається шляхом розв'язання оберненої задачі моделювання, де цільовий профіль задається як форма екструдату у напрямку течії. Завдання полягає у визначенні необхідної геометрії формуючого

каналу головки на виході, яка визначає вирівнювання швидкостей розплаву в області вільної поверхні і геометрію перетину формуючого профілю.

В якості перероблюваного матеріалу, використовуються ПЕВТ. Для опису залежності швидкості зсуву від в'язкості матеріалу, що переробляється застосовується модель в'язкості Берд-Карро [14]:

$$\eta = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty}) \cdot \left(1 + (\lambda \cdot \dot{\gamma})^2\right)^{\frac{n-1}{2}} \quad (3.2)$$

де η – в'язкість, Па·с; η_0 – в'язкість при нульовій швидкості зсуву, Па·с; η_{∞} – в'язкість при нескінченній швидкості зсуву, Па·с; λ – час релаксації, с; n – ступеневий показник.

В даному дослідженні передбачається, що температура полімеру є постійною і рівною 180°C, а параметри при цій температурі, пов'язані з моделлю в'язкості Берд-Карро рівні: $\eta_0 = 5630$ Па·с, $\lambda = 0,32$ с, $n = 0,64$. Потік розплаву полімеру нестисливий [7,13,14]. Гравітаційними і інерційними силами нехтуємо. Рівняння руху дає баланс між силами в'язкості і тиску [13].

Сталій профіль швидкості течії полімеру на вході в головку моделюється для витрати $Q = 10000$ мм³/с. На стінках головки застосовується гранична умова відсутності проковзування.

Результати моделювання та їх аналіз.

Моделювання проводилося для умов отримання наведеної на рисунку 3.64а конфігурації полого профілю. На першому етапі моделювання проводили без урахування можливості компенсації розбухання екструдату і інших ефектів, що показано на рисунку 3.65. Неправильна форма остаточного виробу обумовлена наявністю локальних ділянок непостійного тиску і швидкості течії потоку по довжині перетину формуючого каналу головки. Це обумовлює формування в процесі екструзії профілю спотвореної форми і з різною товщиною стінок (5 і 7 мм). Різниця локальних товщини обумовлено неоднорідністю швидкостей потоку полімеру по товщині перетину (до 20 мм / с), що показано на рисунку 3.65. На підставі результатів, отриманих при першому моделюванні, наступним кроком була реалізація алгоритму Polyflow для вирішення оберненої задачі екструзії, яка полягає у визначенні геометрії формуючого каналу головки для забезпечення бажаної форми екструдованого профілю. Для того, щоб отримати задану остаточну форму екструдату програма дозволяє методом ітерацій, змінювати геометрію формуючого каналу на довжині 60 мм. Результати такого ітераційного моделювання представлені на рисунках 3.65– 3.66. При розгляді кожної ділянки каналу можна простежити особливості перебігу полімеру і визначити області з уповільненим рухом полімерного матеріалу, що може призвести до спотворення форми екструдованого виробу або ж до його локального розкладання.

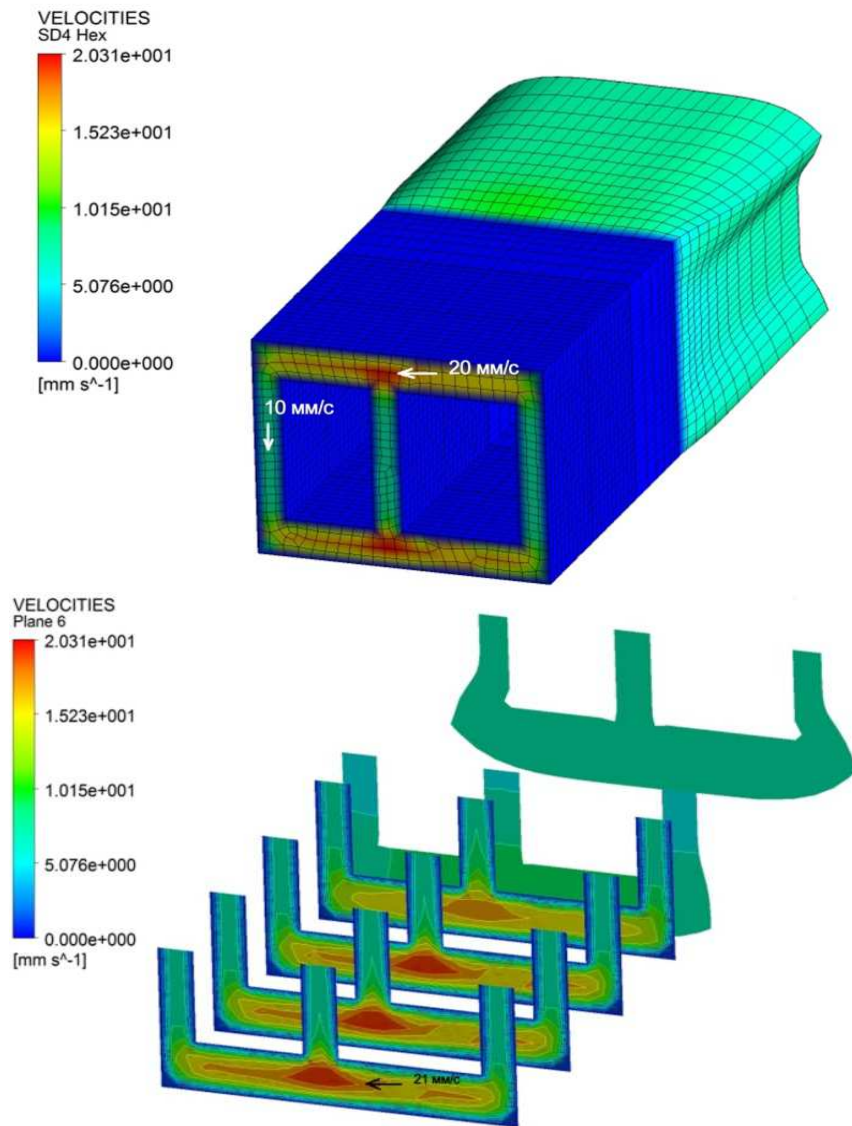
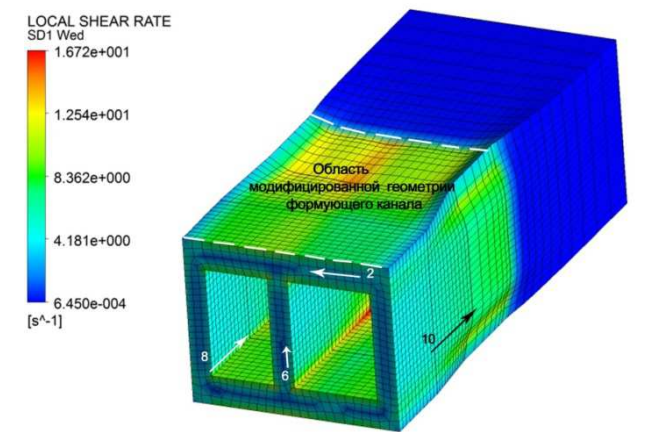
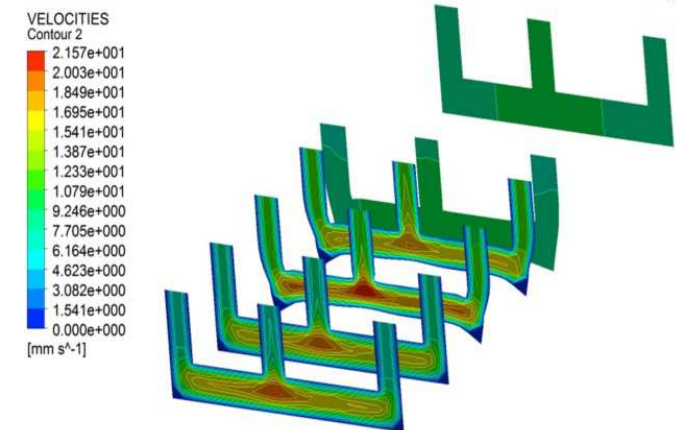


Рисунок 3.65 – Розподіл швидкостей в різних перетинах формуючого каналу головки і вільної ділянки екструдату без оптимізованої геометрії формуючого каналу



а)



б)

Рисунок 3.66 – Розподіл локальної швидкості зсуву і швидкості (а, б) для формуючого каналу головки з оптимізованою геометрією каналу

Щоб уникнути цього розглянута методика моделювання дозволяє проводити уточнення геометрії формуючого каналу головки і отримання екструдованого профілю заданої форми.

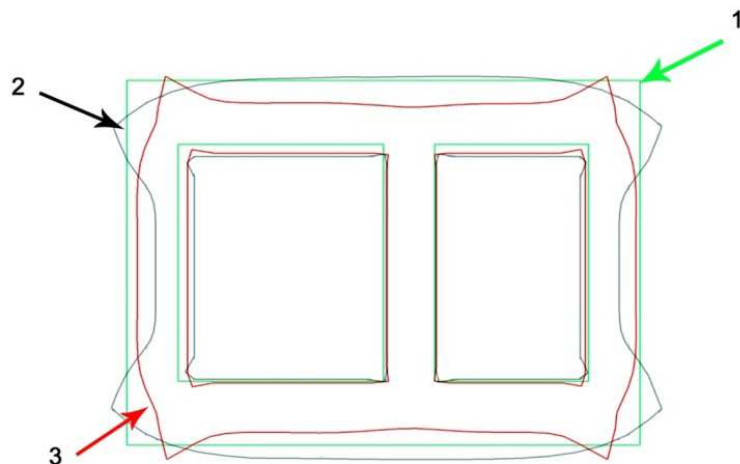


Рисунок 3.67 – Поперечні вихідні перетини області формуючого каналу головки неоптимізованої і оптимізованої форми

1 - задана цільова форма профілю; 2 - неправильна форма профілю кінцевого виробу; 3 - необхідна конфігурація перетину матриці головки

На рисунку 3.67 показані варіанти неоптимізованої і оптимізованої геометрії вихідної області формуючого каналу головки і можливість прогнозування геометрії тільки останньої ділянки формуючого каналу. Обчислювальна потужність програмного гідравлічного моделювання дозволяє здійснювати також прогнозування геометрії не лише у формуючому каналі, а і в предканалі, тобто для формуючих головок з більш складною геометрією. Оскільки будь-який процес моделювання коротший і менш дорогий ніж метод проб і помилок при виготовленні головок, це дає можливість підвищити ефективність їх проектування і виробництва в цілому.

3.3.1 Моделювання і числовий алгоритм оберненого проектування "L-подібного" однокамерного порожнистого профілю

У процесі виробництва екструзійних погонажних профільних виробів не достатньо внесення змін в задані технологічні параметри процесу екструзії, наприклад, температурний режим або швидкість обертання шнеку для компенсування недосконалості розмірів продукції. Геометрія екструдованих профілів в значній мірі залежать від нерівномірного набухання. У разі погонажних кутових і інших несиметричних профілів, або наприклад, квадратних профілів явище розбухання екструдату зумовлює необхідність виконання формуючих каналів дещо іншої геометрії, при якій розплав, виходячи з цієї необхідної, але неортогональної форми, буде розбухати в бажану, ортогональну квадратну геометрію виробу.

Фільери для виробництва відкритих екструзійно-погонажних профілів, таких як U-подібних або L-подібних, не є аксіально-симетричні, на відміну від трубних

форм. Відкриті профілі більш схильні до нерівномірного охолодження, і, таким чином, можуть генерувати залишкові напруження в затверділому екструдаті, які спричиняють спотворення форми екструдату. Критичним правилом проектування відкритих профілів є забезпечення постійної товщини стінок по всьому поперечному перетину продукту. Більш тонкі секції виробів твердіють швидше, коли більш товсті секції все ще залишаються неповністю затверділими. В результаті буде спостерігатись додаткова теплова усадка на більш товстих ділянках і, таким чином, викривлення кінцевого продукту. Проблеми викривлення профільних виробів можуть бути вирішені шляхом створення нової форми поперечного перерізу з більш рівномірною товщиною. Поперечний переріз виробу буде затвердівати більш рівномірно і невелика залишкова напруження буде в пастці твердого екструдату.

Розвиток потужної обчислювальної техніки і досвідчених числових технік дозволяє моделювати, аналізувати і оптимізувати тривимірні екструзійні процеси зі складною геометрією, включаючи нелінійну і в'язкопружну поведінку полімеру. Числове моделювання має потужності для розкриття важливих внутрішніх параметрів процесу екструзії, таких як швидкість, напруження зсуву, розподіл тиску і температури, що неможливо зробити експериментально.

Основним інструментом, що задає кінцеву форму екструдованих погонажних виробів, є екструзійна головка. Завдання числового моделювання полягає в уточненому проектуванні геометрії формуючих каналів екструзійних головок для виробництва пластикових профілів. Метою моделювання є визначення форми каналу головки, що призведе до збалансування витрат на виході з головки, і забезпечення умови отримання заданого профілю виробу. Можливість модифікування форми каналу з використанням алгоритму оптимізації дозволяє проводити розрахунок геометрії формуючих каналів головок по заданих розмірах екструдованих виробів

Процес проектування починається із задавання форми виробу. Заданий виріб представляє собою L-подібний однокамерний полий профіль (рисунок 3.68a) 15 мм × 30 мм з внутрішнім ребром товщиною 1,5 мм.

Розглядається тільки профіль формуючого каналу, який є одним з найбільш важливих елементів у процесі екструзії, так як він повинен компенсувати деформації екструдату після виходу з головки і забезпечити його задану геометрію. Формуючий канал розділений на дві підобласті (як показано на рисунку 3.64б) для забезпечення можливості застосування алгоритмів для перебудови сітки в кожній підобласті при моделюванні їх профілів. Перша підобласть представляє собою канал головки де протікає розплав, в той час як друга підобласть представляє собою екструдований профіль, який знаходиться в контакт з повітрям.

Метою моделювання є визначення форми каналу головки, що призводить до збалансованої витрати і забезпечує відповідну форму цільового профілю екструдату на виході з головки. Геометрія формуючого каналу головки визначається шляхом розв'язання оберненої задачі моделювання, де цільовий профіль задається як форма екструдату у напрямку течії. Завдання полягає у визначенні необхідної геометрії формуючого каналу головки на виході, яка

забезпечує вирівнювання швидкостей розплаву в області вільної поверхні і геометрію перетину формуючого профілю.

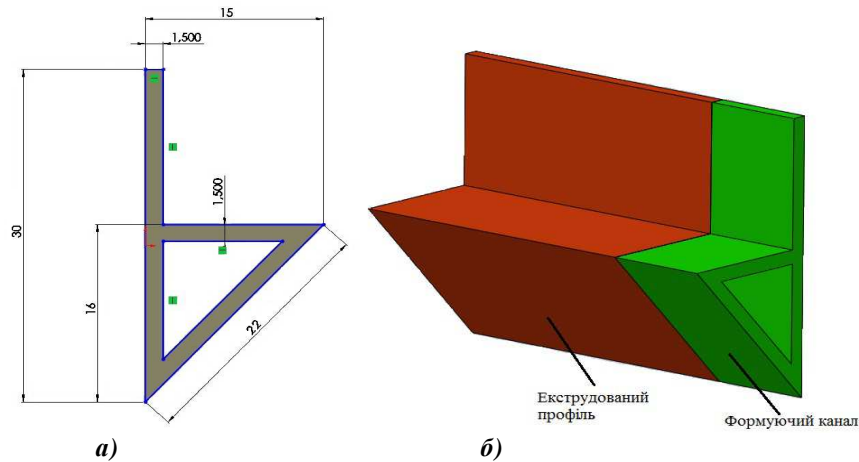


Рисунок 3.68 – Модель L-подібного однокамерного полого профілю
а) поперечний перетин екструдованого профілю, б) схема розбивки на ділянки формуючого каналу головки і вільної ділянки екструдату, який витікає з неї

В якості перероблюваного матеріалу, використовується ПВХ марки SorVyl. Для опису залежності швидкості зсуву від в'язкості перероблюваного матеріалу застосовується модель в'язкості Берд-Карро [98].

В даному дослідженні передбачається, що температура полімеру є постійною і рівною 180°C , а параметри при цій температурі, пов'язані з моделлю в'язкості Берд-Карро рівні: $\eta_0 = 1000 \text{ Па}\cdot\text{с}$; $\eta_{\infty} = 1 \text{ Па}\cdot\text{с}$; $\lambda = 0,5 \text{ с}$; $n = 0,75$. Потік розплаву полімеру нестисливий [100,101,105].

Гравітаційними і інерційними силами нехтуємо. Рівняння руху дає баланс між силами в'язкості і тиску [101].

Сталий профіль швидкості течії полімеру на вході в головку моделюється для витрати $Q = 2580 \text{ мм}^3/\text{с}$. На стінках головки застосовується гранична умова відсутності проковзування.

Розроблені і враховані тільки останні дві ділянки формуючого каналу для моделювання потоку, оскільки вони мають найбільший вплив на форму екструдованого профілю [106,107]. Для моделювання необхідні наступні вхідні дані [106]:

1. Геометрична модель формуючого каналу головки: а. двовимірний профіль вхідної ділянки формуючого каналу; б. двовимірний профіль цільової форми екструдату; в. довжина предканалу, довжина формуючого каналу і довжина поверхні вільного потоку після виходу з головки.

2. Термомеханічні властивості розплаву полімеру: щільність, теплоємність і теплопровідність.

3. Реологічні властивості полімерного розплаву: неньютонівська в'язкість в залежності від швидкості зсуву і температури, і в'язкопружні властивості матеріалу.

4. Умови процесу: температура розплаву на вході, масова витрата у каналі головки (або тиск на вході), температура стінки головки швидкість екструдату на виході з головки.

Результати моделювання та їх аналіз

Моделювання проводилося для умов отримання наведеної на рисунку 3.68 конфігурації порожнього профілю. На першому етапі моделювання проводили без урахування можливості компенсації розбухання екструдату і інших ефектів, що показано на рисунку 3.69. Неправильна форма остаточного виробу обумовлена наявністю локальних ділянок непостійного тиску і швидкості течії потоку по довжині перетину формуючого каналу головки. Це обумовлює формування в процесі екструзії профілю спотвореної форми і з різною товщиною стінок. Різниця локальних товщин обумовлена неоднорідністю швидкостей потоку полімеру по товщині перетину, що показано на рисунку 3.69. На підставі результатів, отриманих при першому моделюванні, наступним кроком була реалізація алгоритму Polyflow для вирішення оберненої задачі екструзії, яка полягає у визначенні геометрії формуючого каналу головки для забезпечення бажаної форми екструдованого профілю. Для того, щоб отримати задану остаточну форму екструдату програма дозволяє методом ітерацій, змінювати геометрію формуючого каналу на довжині 60 мм. Результати такого ітераційного моделювання представлені на рисунках 3.69 – 3.70. При розгляді кожної ділянки каналу можна простежити особливості течії полімеру і визначити області з уповільненим рухом полімерного матеріалу, що може призвести до спотворення форми екструдованого виробу або до локальної деструкції полімеру в ньому.

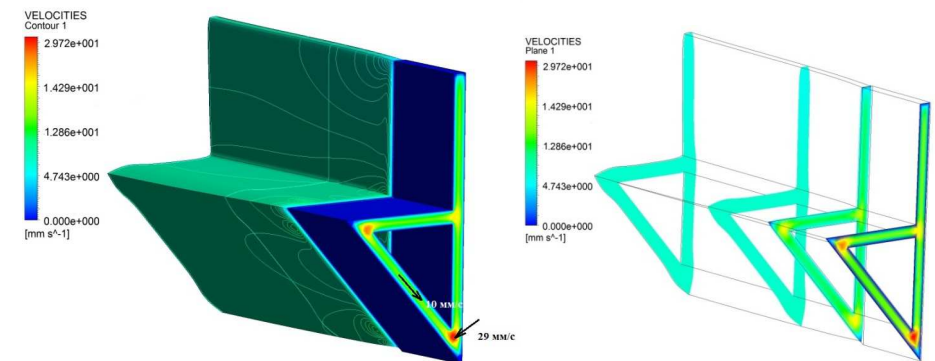
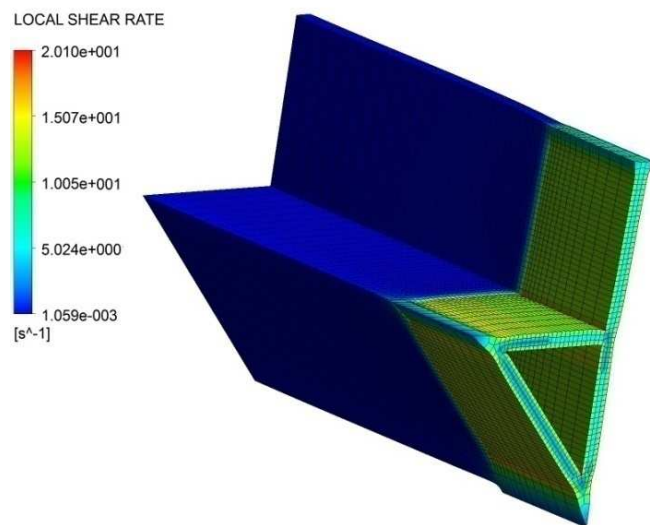
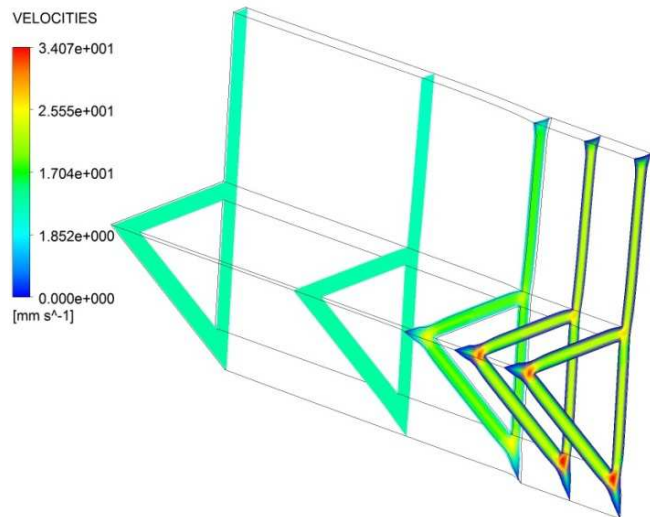


Рисунок 3.69 – Розподіл швидкостей в різних перетинах формуючого каналу головки і вільної ділянки екструдату без оптимізованої геометрії формуючого каналу



a)



б)

Рисунок 3.70 – Розподіл швидкості зсуву і лінійної швидкості (а, б) для формуючого каналу головки з оптимізованою геометрією каналу

Деформація екструдату при зміні геометрії каналу є результатом перегрупування швидкостей, що відбуваються на виході з головки. Частинки, що рухаються від високошвидкісних ділянок головки мають сповільнитися, у той час як частинки, що надходять з низькошвидкісних ділянок, мають прискоритися. На ділянках, де потік рідини має високу швидкість поперечний переріз екструдату

збільшується, і навпаки потік рідини з низькою швидкістю зменшує його поперечний переріз.

Щоб уникнути цього, розглянута методика моделювання дозволяє проводити уточнення геометрії формуючого каналу головки і отримання екструдованого профілю заданої форми.

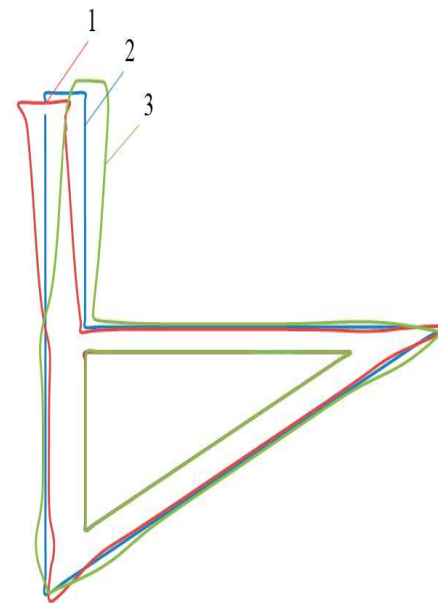


Рисунок 3.71 – Поперечні вихідні перетини області формуючого каналу головки неоптимізованої і оптимізованої форми

1 – необхідна конфігурація перетину матриці головки, 2 – задана цільова форма профілю; 3 – неправильна форма профілю кінцевого виробу

На рисунку 3.71 показані варіанти неоптимізованої і оптимізованої геометрії вихідної області формуючого каналу головки і можливість прогнозування геометрії тільки останньої ділянки формуючого каналу.

Розрахункова область нагадує реальну тривимірну геометрію і поверхню вільного потоку після виходу з формуючого каналу головки, де перерозподіл швидкості (зрівнювання) і релаксації напружень спостерігаються на короткій відстані від виходу з головки. Кінцевий елемент моделі формуючого каналу і ділянка вільної поверхневої складається з 39130 шестиграних елементів і 49938 вузлів. Розрахункова область повинна мати відповідні граничні умови для відображення реальних умов, що присутні у розплаві, який проходить через головку екструдера і виходить у вільну поверхню потоку [107]. Комерційна програма реалізує алгоритм оберненої задачі екструзії, який обчислює форму вихідного перерізу головки, необхідний для досягнення розмірів цільового профілю на виході з вільної поверхні. Програма обчислює форму каналу головки,

яка дасть змогу отримати форму зданого цільового профілю після ефекту розбухання екструдату [106, 107].

Обчислювальна потужність програмного комплексу Polyflow дозволяє здійснювати також прогнозування геометрії в предканалі і в формуючому каналі для випадків з більш складною геометрією. Оскільки будь-який процес моделювання коротший і менш дорогий, ніж метод проб і помилок при виготовленні головок, це дає можливість підвищити ефективність їх проектування і виробництва.

Методика проведення розрахунку каналів профільних погонажних екструзійних головок методом оберненої екструзії представлена в Додатку Б.

3.4 Висновки

Створена методика експериментальних досліджень реологічних параметрів матеріалу і характеру ефекту розбухання полімерного матеріалу після виходу з формуючого інструменту. Прийняті методики досліджень забезпечують відтворюваність експериментів.

В ході числових та натуральних експериментів встановлена кореляція між ними, що підтверджує адекватність розробленої аналітичної моделі та створеної в середовищі програми "Ansys Polyflow" скінченоеlementної моделі, на якій проводились числові експерименти. Результати проведених числових досліджень процесу зміни конфігурації струменя на виході з формуючого інструменту екструдера є основою для уточненого моделювання процесів екструзії розплавів полімерів при проектуванні нових екструзійних головок. Результати також можуть бути застосовані для обґрунтування доцільних режимів процесу екструзії з метою поліпшення якісних характеристик погонажних виробів.

Проектування екструзійних головок для отримання екструдованих полімерних профілів є складним завданням, оскільки остаточний розмір профілю екструдату залежить не тільки від геометричної форми конструкції головки, але і від властивостей пластмас і технологічних параметрів процесу екструзії. Процес проектування повинен охоплювати вплив кожного конструктивного елементу екструзійних головок (приєднувальний ділянку, адаптер, перехідною ділянку і предканал) на особливості перебігу полімеру в формувальному каналі та формування остаточної геометрії формованого виробу. Останні дві ділянки відіграють найбільш значну роль на етапі екструзійного формування.

Інженерне моделювання дозволяє вирішувати в виробництві найважливіші питання виробництва екструзійного інструменту, економії засобів і часу при їх розробці. Перелік переваг, отриманих шляхом внесення цих змін:

- ♦ краща якість продукції за рахунок більш рівномірного охолодження і усадки: рівність продукції.
- ♦ Зменшення витрат матеріалів шляхом видалення товстих, непотрібних ділянок: економія матеріальних витрат.
- ♦ збільшення швидкості охолодження за рахунок зменшеної температури екструдованого профілю.

Розроблена методика забезпечує вирішення оберненої задачі процесу екструзії, тобто за умови відомих параметрів одержуваного екструзією виробу проектувати необхідну конфігурацію фільери екструзійної головки. Методика передбачає використання багатоваріантних розрахунків області з методами перебудови сітки, найбільш придатних для 3D обернених задач екструзії. Нелінійна задача вирішується за допомогою схеми еволюції для забезпечення збіжності задачі.

Нижче наведені загальні рекомендації й вимоги до конструювання екструзійних головок:

- забезпечення збалансованого потоку розплаву на виході з головки екструдера;
- зведення до мінімуму перепаду тиску, необхідного для забезпечення збалансованого потоку, що дасть можливість забезпечити максимальну швидкість масової витрати з найменшим розміром необхідного екструдера;
- забезпечення управління пристроєм потоку в головці з метою оптимізації розподілу потоку;
- раціоналізувати проходження потоку в формуючому каналі, щоб уникнути зон застою потоку. Такі області полегшують розкладання полімерного розплаву з тривалою витримкою при підвищених температурах;
- використання модульної конструкції з складених пластин для технологічності, зручного збирання та розбирання, а також зручності модифікації і очищення;
- довжина формуючого каналу повинна перевищувати товщину продукту (або зазору) не менше ніж в 10 разів для полегшення релаксації напружень в розплаві полімеру всередині головки;
- уникати товстих і нерівномірних товщин стінки екструдату для досягнення кращого контролю балансу потоку в головці, звести до мінімуму використання матеріалу, скоротити час охолодження, а також звести до мінімуму постекструзійну деформацію виробів;
- уникати або звести до мінімуму порожнисті профілі, та як вони збільшують вартість виготовлення головок і ускладнюють подальший процес охолодження екструдату.

Конструкція головки повинна включати відповідні функції регулювання, які будуть встановлені (або оновлені) в процесі екструзії для компенсування недосконалості кінцевого продукту, тобто охолодженого екструдату. Для незмінної геометрії головки, регулювання недосконалості профілю може бути досягнуто шляхом зміни параметрів процесу екструзії, таких як температура, швидкість потоку, швидкість охолодження, і / або натяжна швидкість. Тим не менш, важливо оптимізувати конструкцію головки для внесення необхідних корективів. За рахунок інтеграції комп'ютерного моделювання з емпіричними даними, процес проектування головки може бути поліпшений. Кращий метод конструювання головок надає поліпшення якості продукту і скорочення часу для розробки та оптимізації процесу екструзії, що призводить до зниження матеріальних витрат.

4 АПРОБАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ЧИСЛОВОГО МОДЕЛЮВАННЯ ФОРМУЮЧИХ КАНАЛІВ ЕКСТРУЗІЙНИХ ГОЛОВОК В ПРОМИСЛОВИХ УМОВАХ

В процесі виконання досліджень було розроблено нові конструкції екструзійних головок, а також на базі здійсненого числового моделювання проведено уточнення параметрів переробного обладнання.

З метою перевірки достовірності числового моделювання оберненої задачі екструзії для обчислення форми вихідного перерізу головки, необхідного для досягнення розмірів цільового профілю на виході з вільної поверхні, була розроблена і виготовлена вдоскоалена конструкція екструзійної головки для виробництва L – подібного однокамерного порожнього погонажного профілю типорозміру 30 мм × 15 мм, з товщиною стінки 1,5 мм та проведено експериментальне дослідження в умовах діючого наукового виробничого підприємства.

Експериментальні дані по отриманню профілю приведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Експериментальні дані

Назва параметру	Досліджуваний матеріал
	ПВХ
Типорозмір профілю, мм/мм	30x15
Продуктивність, кг/год	16,6
Оберти черв'яка, об/хв	25,7
Час формування виробу (довжиною 2,75 м), с	97,7
Вага виробу, г/шт	220
Молекулярна маса ПВХ при температурі приведення	1500
Температура твердого полімеру	30° С
Коефіцієнт температурної залежності в'язкості	0.0001
Динамічна в'язкість в каналі профілюючої матриці, Па·с	1500
Коефіцієнт фільтрної витяжки полімеру	1,1
Густина розплаву ПВХ, кг/м ³	1600

Дослідженню піддавалася композиція ПВХ виробництва Німеччини марки SorVul та виробництва України. Слід зазначити, що аналогічні дослідження, проведенні на інших марках сировини показали, що залежно від рецептури композиції експлуатаційні і технологічні параметри процесу можуть значно відрізнятися.

До технологічних параметрів переробки пластмас методом екструзії відносяться: температура по зонам екструдера, тиск розплаву, температура зон головки, швидкість обертання двигуна дозатора, швидкість обертання двигуна приводу черв'яка.



Рисунок 4.9 – Фотографії промислового обладнання процесу експерименту

Профільні екструзійні головки зазвичай зроблені з серії зібраних пластин з каналами, для формування складного переходу від кільцевого вихідного перерізу з екструдера до заданої кінцевої конфігурації вихідної ділянки формуючого каналу головки. Конструкція із складених пластин робиться для полегшення виробництва і в міру необхідності дозволяє корегування частин.

Складені пластини профілю головки як правило, мають такі елементи:

- Пластина адаптер: формує перехід від круглого вихідного перерізу з екструдера для апроксимації форми профілю і спрощений перехід від пластини адаптера до предпластини вхідного отвору.
- Предпластина: надає значне регулювання потоку за рахунок зменшення товщини в зонах сильного потоку і збільшення товщини в ділянках з низькою швидкістю потоку в головці, щоб зробити потік більш рівномірним.
- Пластина формуючого кінцевого перерізу головки: забезпечує суцільний поперечний переріз, який, як правило, в 10 разів більше, ніж товщина екструдованого продукту, для забезпечення явища релаксації в'язкопружних напружень в розплаві перед виходом з екструзійної головки (зменшує розбухання екструдату) і утворює форму екструдату на виході з головки. Вихідний профіль має необхідну форму для компенсації деформації екструдату після виходу з головки (розбухання і просадка).

Під час проведення експериментальних досліджень в якості досліджуваного матеріалу використовувалися гранульований зразок полімерного матеріалу марки SorVul виробника Німеччина.

Процес проведення експерименту описаний у розділі 2.4.

За результатами даного експерименту здійснювалась перевірка достовірності числового моделювання оберненої задачі екструзії для обчислення форми вихідного перерізу головки, необхідного для досягнення розмірів цільового профілю на виході з вільної поверхні.

Експериментально отриманий вихідний профіль при оптимізованій геометрії формуючого каналу головки показаний на рисунку 4.10. Дослідний формуючий канал формує екструдат, який являє собою L-подібний однокамерний поглинаний профіль зі сторонами однакової товщини.

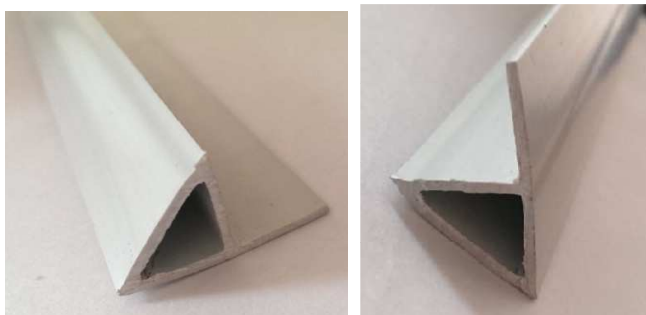


Рисунок 4.10 – Геометрія експериментального зразка L – подібного однокамерного порожнього погоняного профілю

Геометричні розміри профілю уточненої геометрії формуючого каналу головки відповідають заданим формам цільового профілю: 30 мм × 15 мм, товщина стінки 1,5 мм, довжина головки $L_{\text{гол}} = 0,3$ м; довжина вільного кінця $L_{\text{проф}} = 0,6$ м.

Зібрані пластини головки для виробництва L-подібного однокамерного порожнього профілю показані на рисунку 4.11. На цьому рисунку в розібраному вигляді показані пластини головки, поперечний переріз зібраної головки.

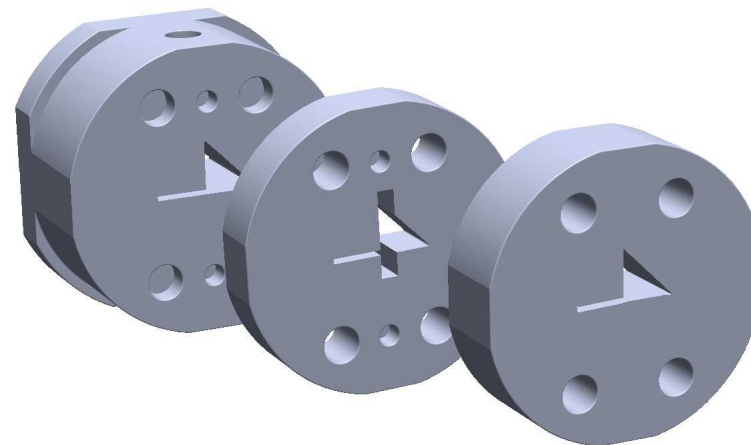
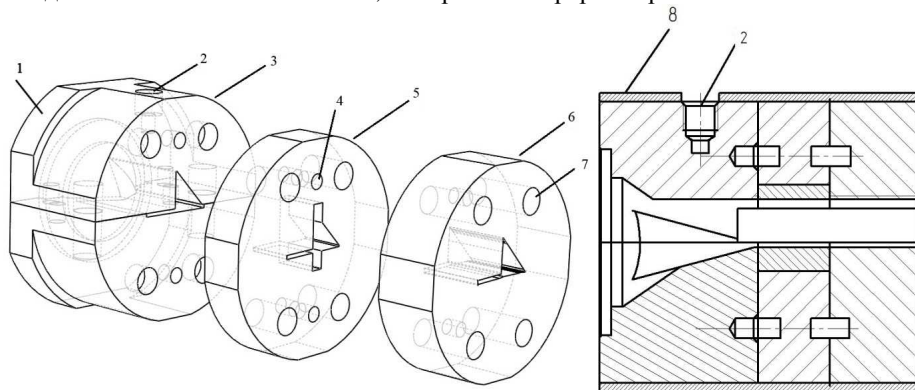


Рисунок 4.11 – Змодельована головка для виробництва L-"подібного" однокамерного порожнього профілю: а) розібраний вид; б) вид в розрізі

1 – монтажна пластина, 2 – отвір для термопари; 3 – пластина адаптер, 4 – отвір під розстановку штифтів; 5 – предпластина; 6 – пластина формуючого кінцевого перерізу головки, 7 – отвір під болт, 8 – стрічковий нагрівач

На рисунку 4.12 показана експериментально змодельована пластина формуючого кінцевого перерізу головки, вихідний профіль має необхідну форму для компенсації деформації екструдату після виходу з головки (розбухання і просадка) і отримання екструдованого профілю заданої форми.

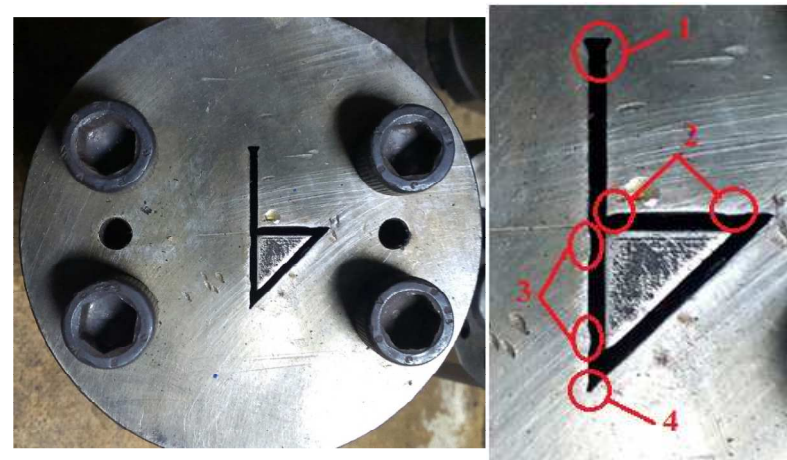


Рисунок 4.12– Кінцевий переріз експериментально змодельованої головки для виробництва L – подібного однокамерного порожнього погоняного профілю

1 – область з розширеними краями; 2,3 – область зі впадинами; 4 – область з впадиною і витягнутим кутом

Результат натурного експерименту і числового моделювання задачі оберненої екструзії для обчислення форми вихідного перерізу головки при течії в'язкопружного розплаву полімеру підтверджує доцільність і можливість використання даної методики для досягнення розмірів цільового профілю на виході з вільної поверхні, при моделюванні течії розплаву полімеру різного типу погонажного профілю на виході з формуючого каналу інструменту екструдера.

Створені тривимірні моделі конструкцій та вузлів дозволяють більш точно обґрунтувати вибір їх геометричних і конструктивних параметрів та уникнути багатьох помилок, характерних при використанні традиційного підходу.

В результаті промислової апробації встановлено, що використання запропонованої методики автоматизованого проектування і конструктивних пропозицій дозволяє вдосконалити технологічні параметри процесів та конструкції робочих органів, за яких забезпечується підвищена продуктивність та якість виробів за умов зниження енергоємності процесів їх виробництва.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Tanner R. I. Rheology: an historical perspective / R. I. Tanner, K. Walters. – Elsevier, Amsterdam, 1998. – 268 p.
2. Spencer R. S. On the flow instabilities of a molten polymer / R. S. Spencer, R. E. Dillon // *J Colloid Sci.* – 1949. – V.4. – P. 241-253.
3. Bagley E. B. Effect of die geometry on polymer melt fracture and extrudate distortion / E. B. Bagley, H. P. Schrieber // *Trans. Soc. Rheol.* – 1961. – V.5. – P. 341-353.
4. Tordella J. P. Capillary flow of molten polyethylene – a photographic study of melt fracture / J. P. Tordella // *Trans. Soc. Rheol.* – 1957. – V.1. – P. 203.
5. Han C. D. Studies of converging flows of viscoelastic polymer melts / C. D. Han, L. H. Drexler. // *J. Appl. Polym. Sci.* – 1973. – V.17. – P. 2329–2354.
6. Han C. D. The Flow of High Polymers / C. D. Han, K. U. Kim. // *Polym.Eng.Sci.* – 1971. – V.11. – P. 395-401.
7. Xue S. C. Three dimensional numerical simulations of viscoelastic flows through planar contractions / S. C. Xue, N. Phan-Thien, R. I. Tanner. // *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* – 1998. – V.74. – P. 129-245.
8. Tanner R. I. Two and three-dimensional finite volume methods for flows of viscoelastic fluids / R. I. Tanner, N. Phan-Thien, X. Huang. – Seville, Spain. : Proc.4th Eur. Cong. Rheology, 1994. – 362-364 p.
9. Baracos G. Non-isothermal viscoelastic simulations of extrusion through dies and prediction of the bending phenomenon / G. Baracos, E. Mitsoulis // *J. Non-Newtonian Mech.* – 1996. – V. 62. – P. 55-79.
10. Bird R. B. Dynamics of polymer Liquids / R. B. Bird, R. S. Armstrong, O. Hassager. – Wiley, New-York : Fluid mechanics, 1987 – V. 1.– 649 p.
11. Сівецький В. І. Комп'ютерне моделювання та проектування екструзійного полімерного устаткування / В. І. Сівецький, Д. Е. Сідоров, О. Л. Сокольський – К.: НТУУ КПІ, 2007. – 188 с.
12. Carniero O. S. Recent developments in automatic die design for profile extrusion / O. S. Carniero, J. M. Norbega // *Plastics Rubber and Composites* – 2004. – V. 33. – P. 400-408.
13. Сахаров О. С. Комп'ютерне моделювання процесу течії розплавів полімерів в формуючих каналах / О. С. Сахаров, В. І. Сівецький, О. Л. Сокольський // "Индустрия тары и упаковки": семинар, 3 квітня 2002 р.: тези доп. – К.: "Мир упаковки", 2002.
14. Kostic M. M. Design of Extrusion Dies / M. M. Kostic, L. G. Reifschneider // *Encyclopedia of Chemical Processing.* – 2006. – P. 633-649.
15. Кузяев И. М. Моделирование экструзии и экструдеров при переработке полимеров: монография / И. М. Кузяев, В. А. Сви́дeрский, А. Д. Петухов. – Киев: Политехника, 2016. – 412 с. – (В 2 ч.).
16. Michaeli W. Extrusion Dies for Plastics and Rubber Design and Engineering Computations / W. Michaeli. – Hanser Gardner Publications. – 2007. – 472 p. – (Third Edition)
17. Панов А. А. Разработка конструкций и метода расчета многоручьевых экструзионных головок : дис. канд. техн. наук : 05.02.13 / А. А. Панов – Уфа,

2002. – 165 с.
18. Tanner R. I. A new inelastic theory of extrudate swell / R. I. Tanner // J. Non-Newtonian Fluid Mech. – 1980. – V.6 – P.289
 19. Han C. D. Rheology in Polymer Processing / D. C. Chang // Academic Press. – 1976. – 367 p.
 20. Мак-Келви Д. М. Переработка полимеров / Д. М. Мак-Келви. – Москва: Химия, 1965. – 442 с.
 21. Фишер Е. Экструзия пластических масс / Е. Фишер – Москва: Химия, 1970. – 288 с.:ил.
 22. Шен М. Вязкоупругие релаксации в полимерах / М. Шен – Москва: Мир, 1974. – 270 с.:ил.
 23. Фридман М. Л. Технология переработки кристаллических полиолефинов / М. Л. Фридман. – Москва: Химия, 1977. – 398 с.ил.
 24. Nickell R. E. The solution of viscous incompressible jet and free surface flows using finite-element methods / R. E. Nickell, R. I. Tanner, B. Caswell // J. Fluid Mech. – 1974. – V.65. – P.189.
 25. Georgios G. A singular finite element for Stokes flow: the stick-slip problem / G. Georgios, O. Lorraine, S. William // Int. J. For Num. Meth. In Fluids. – 1989. – V.9. – P. 1353-1367.
 26. Georgios G. The integrated singular basis function method for the stick-slip and the die-swell problems / G. Georgios, O. Lorraine, S. A. William // Int. J. For Num. Meth. In Fluids. – 1991. – V.13. – P. 1251-1235.
 27. Liu T. Finite difference solution of a newtonian jet swell problem / T. Liu, T. Cheng // Int. J. For Num. Meth. In Fluids. – 1991. – V.12. – P. 125-142.
 28. Allain C. Die swell in semi rigid polymer solutions / C. Allain, M. Cloitre, P. Perrot // Eur. J. Mech., B/Fluids – 1993. – V.12, № 2. – P. 175-186.
 29. Beraudo C. A finite element method for computing the flow of multi-mode viscoelastic fluids: comparison with experiments / C. Beraudo, A. Fortin, T. Coupez // J. Non-Newtonian Fluid Mech. – 1998. – V.75. – P. 23.
 30. Silliman W. J. Separating flow near a static contact line: slip at the all and shape of the free surface / W. J. Silliman, L. E. Scriven // J. Comput. Phys. – 1980. – V.34. – P. 287-313.
 31. Wesson R. D. Flow singularity and slip velocity in plane extrudate swell computations / R. D. Wesson, T. C. Papanastasiou // J. Non-Newtonian Fluid Mech. – 1988. – V.26. – P. 227.
 32. Phan-Thien N. Influence of wall slip on extrudate swell: a boundary element investigation / N. Phan-Thien // J. Non-Newtonian Fluid Mech. – 1988. – V.26. – P. 327.
 33. Ramamurthy A. V. Wall slip in viscous fluids and influence of materials of constructions / A. V. Ramamurthy // J. Rheology – 1988. – V.30. – P. 337.
 34. Luo X. L. A singular finite element for Non-isothermal viscoelastic simulations of extrusion through dies / X. L. Luo, R. I. Tanner // Rheol. Acta – 1987. – V.26. – P. 499-507.
 35. Barakos G. Non-isothermal viscoelastic simulations of extrusion through dies and prediction of the bending phenomenon / G. Barakos, E. Mitsoulis // J. Non-NewtonianFluidMech. – 1996. – V.62. – P. 55-79.
 36. Белобородова Т. Г. разработка конструкции и метода расчета установки для измельчения полимерных отходов : дис. канд. техн. наук : 05.02.13 / Белобородова Татьяна Геннадиевна – Уфа, 2001. – 159 с.
 37. Панов А. К. Гидродинамика потоков аномально-вязких полимерных систем в формирующих каналах / А. К. Панов, А. Р. Апасов. – Уфа: УГНТУ, 1994. – 260 с.
 38. Виноградов Г. В. Реология полимеров / Г. В. Виноградов, А. Я. Малкин. – Москва: Химия, 1997. – 438 с.
 39. Басов Н. И. Расчет и конструирование оборудования для производства и переработки пластмасс / Н. И. Басов, Ю. В. Казанцев, В. А. Любартович. – Москва: Химия, 1986 – 488 с.
 40. Мехлис А. Н. Разработка конструкции и метода расчета экструзионных головок для изготовления оболочек обрамления труб : дис. канд. техн. наук : 05.02.13 / Мехлис Александр Николаевич – Уфа, 2001. – 137 с.
 41. Ким В. С. Теория и практика экструзии полимеров / В. С. Ким – Москва: Химия, КолосС, 2005. – 568с
 42. Mitsoulis E. Annular extrudate swell of pseudoplastic and viscoplastic fluids / E. Mitsoulis // J. Non-Newton. Fluid Mech. – 2007. – V.141. – P. 138–147.
 43. Karapetsas G. Transient squeeze flow of viscoplastic materials / G. Karapetsas, J. Tsamopoulos // J. Non-Newton. Fluid Mech. – 2006. – V.133. – P. 35–56.
 44. Dimakopoulos Y. Transient displacement of a Newtonian fluid by air in straight or suddenly constricted tubes / Y. Dimakopoulos, J. Tsamopoulos // Phys. Fluids. – 2003. – V15 (7). – P. 1973–1991.
 45. Kostic M. M. Computational desing of a U-profile die and calibrator / M. M. Kostic, L. G. Reifschneider // ANTEC. – 2004. – P. 246-250.
 46. Liu T. Finite difference solution of a Newtonian jet swell problem / T. Liu, T. Cheng // Int. J. For Num. Meth. In Fluids. – 1991. – V.12. – P. 125-142.
 47. Georgiou G. Annular liquid jets at high Reynolds numbers / G. Georgiou // Int. J. Numer. Methods Fluids. – 2003. – V.4. – P. 117–130.
 48. Housiadas K. / The steady annular extrusion of a Newtonian liquid under gravity and surface tension / K. Housiadas, G. Georgiou, J. Tsamopoulos // Int. J. Numer. Methods Fluids. – 2000. – V.33. – P. 1099–1119.
 49. Tsamopoulos J. Steady bubble rise and deformation in Newtonian and viscoplastic fluids and conditions for their entrapment / J. Tsamopoulos, Y. Dimakopoulos, N. Chatzidai, G. Karapetsas, M. Pavlidis // J. Fluid Mech. – 2008. – V.601. – P. 123–164.
 50. Ansari M. Rheology and Processing of HDPEs: Effects of Molecular Characteristics / M. Ansari. — Vancouver: The University of British Columbia, 2012. — 162 p.
 51. Ферри Дж. Вязкоупругие свойства полимеров / Дж. Ферри. – Москва: Изд-во иностр. лит., 1963. – 535 с.
 52. Виноградов Г. В. Реологические свойства полимеров в текучем состоянии / Г. В. Виноградов, А. Я. Малкин, Ю. Г. Яновский, В. Ф. Шумский, Е. А. Дзюра. // Мех. Полимеров. – 1969. – №1. – С. 164-181.
 53. White S. A. Review of the entry flow problem: experimental and numerical / S. A. White, A. D. Gotsis, D. G. Baird // J. Non-Newtonian Fluid Mech. – 1987. – V.24. – P. 121-160.

54. Evans R. E. Flow characteristics associated with abrupt changes in geometry in the case of highly elastic liquids / R. E. Evans, K. Walters // *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* – 1986. – V.20. – P. 11-29.
55. Boger D. Further observation of elastic effect in tubular entry flows / D. Boger, D. Hur, R. Binnington // *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* – 1986. – V.20. – P.86-98.
56. Piau J. Effect of die entrance filtering on mitigation of upstream instability during extrusion of polymer melts / J. Piau, S. Nigen, El Kissi // *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* – 2000. – V.91. – P. 37-57.
57. Chung T. J. *Computational Fluid Dynamics* / T. J. Chung // Cambridge University Press, Cambridge. – 2002. – P. 533–580.
58. Pinho F. T. Axial annular flow of a nonlinear viscoelastic fluid – an analytical solution / F. T. Pinho, P. J. Oliveira // *J. Non-Newton. Fluid Mech.* – 2000. – V. 93. – P. 325–337.
59. Cruz D. O. A. Analytical solutions for fully developed laminar flow of some viscoelastic liquids with a Newtonian solvent contribution / D. O. A. Cruz, F. T. Pinho, P. J. Oliveira // *J. Non-Newton. Fluid Mech.* – 2005. – V.132. – P. 28–35.
60. Karibullina F. R. Non-Newtonian fluid film creeping due to thermocapillary force in transport phenomena in two-phase flow / F. R. Karibullina, F. A. Garifoullin, F. Kh. Tazioukov // ed. Ch. Boyadjiev, Bulgaria. – 1997. – P. 20-22.
61. Karapetsas G. Transient squeeze flow of viscoplastic materials / G. Karapetsas, J. Tsamopoulos // *J. Non-Newton. Fluid Mech.* – 2006. – V.133. – P. 35–56.
62. Talay Akyildiz F. Viscoelastic lubrication with Phan-Tien-Tanner fluid (PTT) / F. Talay Akyildiz, H. Bellout // *ASME Journal of Tribology.* – 2004. – V. 126(2). – P. 288-291.
63. Crochet N. J. *Numerical Methods in Non-Newtonian Fluid Mechanics* / N. J. Crochet, K. Walters // *Ann. Rev. Fluid. Mech.* – 1983. – V. 15. – P.241.
64. Clemeur N. On the evaluation of some differential formulations for the pom-pom constitutive model / N. Clemeur, R. P. G. Rutgers, and B. Debbaut.// *Rheol. Acta.* – 2003. – V.42(1). – P. 217-231.
65. ANSYS Polyflow User's Guide – Canonsburg, PA 15317, 2013. – 790 p. – (ANSYS, Inc. South pointe).
66. McLeish T. C. B. Molecular constitutive equations for a class of branched polymers. The pom-pom polymer / T. C. B. McLeish, R. C. Larson // *J. Rheol.* – 1998. – V.42(1). – P. 82-112.
67. Manuel A. Alves Study of steady pipe and channel flows of a single-mode Phan-Thien–Tanner fluid / Manuel A. Alves, Fernando T. Pinho, Paulo J. Oliveira // *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* – 2001. – V.101. – P. 55–76.
68. Baaijens Frank P.T. Viscoelastic flow past a confined cylinder of a low density polyethylene melt / P. T. Baaijens Frank, H. A. Selen Sjaak, P. W. Baaijens Hans, W. M. Peters Gerrit, E. H. Meijer Han // *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* – 1997.– V.68. – P. 173-203.
69. Pauli L. Towards shape optimization of profile extrusion dies with respect to homogeneous die swell / L. Pauli, M. Behr, S. Elgeti // *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics.* – 2013. – V.200. – P. 79-87.
70. Karapetsas G. Steady extrusion of viscoelastic materials from an annular die / George Karapetsas, John Tsamopoulos // *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* – 2008. – V.154. – P. 136–152.
71. Mirzazadeh M. Purely tangential flow of a PTT-viscoelastic fluid within a concentric annulus / M. Mirzazadeh, M. P. Escudier, F. Rashidi, S. H. Hashemabadi // *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* – 2005. – V.129. – P. 88–97.
72. Mua Y. Modeling and simulation of three-dimensional planar contraction flow of viscoelastic fluids with PTT, Giesekus and FENE-P constitutive models / Yue Mua, Guoqun Zhao, Xianghong Wua, Jiqiang Zhai // *Applied Mathematics and Computation.* – 2012. – V.218. – P. 8429–8443.
73. Robert L. Stick-slip flow of high density PE in a transparent slip die investigated by laser Doppler velocimetry / L. Robert, Y. Demay, B. Vergnes // *Rheologica Acta.* – 2004. – N 43. – P. 89-98.
74. Быстрай Г. П. Влияние вязкоупругих свойств жидкости и последствие на механизм возникновения развитой турбулентности / Г. П. Быстрай, С. И. Студенок // Наука и технологии. Избранные тр. Российской школы «К 70-летию Г. П. Вяткина». – М.: РАН, 2005. – С. 163–174
75. Luo X. L. Finite element simulation of long and short die extrusion experiments using integral models / X. L. Luo, R. I. Tanner // *Int. J. Numer. Meth. Eng.* – 1988. – N 25. – P. 9-22.
76. Goublomme A. Numerical prediction of extrudate swell of a high-density polyethylene / A. Goublomme, B. Draily, M. J. Crochet // *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* – 1992. – N 44. – P. 171-195.
77. Bush M. B. Three-dimensional viscous flows with a free surface: flow out of a long square die / M. B. Bush, N. Phan-Thien // *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* – 1985. – N18. – P. 211–218.
78. Tran-Cong T. Three-dimensional study of extrusion processes by boundary element method 2. Extrusion of a viscoelastic fluid / T. Tran-Cong, N. Phan-Thien // *Rheol. Acta* – 1988. – N 27. – P. 639–648.
79. Karagiannis A. Three-dimensional extrudate swell of creeping Newtonian jets / A. Karagiannis, A. N. Hrymak, J. Vlachopoulos // *AIChE J.* – 1988. – N 34.– P. 2088–2094.
80. Shiojima T. Three-dimensional finite element method for extrudate swells of a Maxwell fluid / T. Shiojima, Y. Shimazaki // *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* – 1990. – N 34. – P. 269–288.
81. Wambersie O. Transient finite element method for calculating steady state three-dimensional free surface / O. Wambersie, M. J. Crochet // *Int. J. Numer. Meth. Fluids* – 1992. – N 14. – P. 343–360.
82. Legat V. Prediction of three-dimensional general shape extrudates by an implicit scheme / V. Legat, J. M. Marshal // *Int. J. Numer. Meth. Fluids* – 1992. – N 14. – P. 609–625.
83. Тадмор З. Теоретические основы переработки полимеров / З. Тадмор, К. Гогос. – Москва: Химия, 1984. – 632 с. – (Пер. с англ. под ред. Торнера Р. В.).
84. Сівецький В. І., Сокольський О. Л., Івіцький І. І. Методики визначення наявності, характеру та величини пристінних ефектів при течії полімерних

матеріалів / В. І. Сівецький, О. Л. Сокольський, І. І. Івіцький // Технологический аудит и резервы производства. — 2015. — № 4. — С. 48-52.

85. Kennings R. An algorithm for the simulation of transient viscoelastic flows with free surfaces / R. Kennings // J.Comp. Phys. — 1986. — V.62, №1. — P. 199-220.

86. Основы научных исследований: Учеб. Для техн. Вузов/ [В.И. Крутов, И.М. Грушко, В.В. Попов и др] Под ред. В.И. Крутова, В.В. Попова. — Москва: Высш. шк., 1989. — 400 с.

87. Кафаров В. В. Методы кибернетики в химии и химической технологии / В. В. Кафаров. — Москва: Химия, 1971. — 496 с.

88. Адлер Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Макаров, Ю. В. Грановский — 2-е изд. доп., перераб. — Москва: Химия, 1976. — 280 с.

89. Ахназарова С. Л. Методы оптимизации эксперимента в химической технологии: Учеб. Пособие / С. Л. Ахназарова, В. В. Кафаров.— 2-е изд. доп., перераб. — Москва: Высш. шк. 1985. — 327 с.

90. Guillet Seriai M. Quantitative evaluation of extrudate swell from viscoelastic properties of polysterene / M. Seriai Guillet // Rheol. Acta . — 1991. — N 30. —P. 540-548.

91. Вачагин К. Д. Методика расчета пропускной способности прямоугольного сечения при течении расплавов полимеров / К. Д. Вачагин, В. И. Большаков, Б. Ф. Двоеглазов // Машины и аппараты химической технологии: сб.науч.тр. — Казань, 1973. — № 1. — С. 81-84.

92. Аскадский А. А. Деформация полимеров / А. А. Аскадский. — Москва: Химия, 1973. — 447 с.

93. Басов Н. И. Расчет и конструирование формующего инструмента для изготовления изделий из полимерных материалов: Учебник для вузов / Н. И. Басов, В. А. Брагинский, Ю. В. Казанков. — Москва: Химия, 1991. — 352 с.

94. Панов А. К. Гидродинамика потоков вномально-вязких полимерных систем в формующих каналах / А. К. Панов, А. Р. Анасов. — Уфа.: Изд-во УГНТУ. — 1994. — 296 с.

95. Polymer-chemie.de [Электронный ресурс] : [Интернет-портал]. — Электронні дані. — [Germany: Polymer-Chemie GmbH]. — Режим доступа: <http://www.polymer-chemie.de/produkte-anwendungen/hart-pvc-granulate> (дата звернення 30.03.2013). — Назва з екрана.

96. Босый В. В. Инженерные методы расчета погрешностей при выполнении лабораторных работ по курсам «Тепломассообмен» и «Техническая термодинамика» / В. В. Босый, Г. Н. Васильченко, Е. Н. Панов.— Киев, 1985. — 72 с.

97. Whipple B. A. Velocity distribution in die swell / B. A. Whipple, C. T Hill // AIChE. — 1978. — V.24. — P. 664-679.

98. ANSYS POLYFLOW 12.1 User's Guide, 2010. — 859 p. — (ANSYS, Inc. is certified to ISO 9001:2008).

99. Sienz J. Sensitivity analysis for the design of profile extrusion dies / J.Sienz, A.Goublomme, M. Luege // Computers and Structures. — 2010. — N88. —P. 610-624.

100. Biba N. 3D FEM Simulation system for optimization of profile extrusion / Nikolai Biba, Sergei Stebunov and Andrey Lishny // Quantor Form Ltd. — 2004. —P. 1-4.

101. Yilmaz, O. A method to obtain balanced flow in profile extrusion dies / O. Yilmaz, K. Hirkkopru // ANTEC. — 2009. — P. 1566-1571.

102. Kevin R. J. Three-dimensional streamlined finite elements: design of extrusion dies / R. J. Kevin, T. C. Ellwood, O. J. Wilkes // International journal for numerical methods in fluids. — 1992. — N 14. — P.13-24.

103. Tran-Cong T. An inverse problem by boundary element method / T. Tran-Cong, T. Nguyen-Thien, A. L. . Graham. // Transactions on Modelling and Simulation. — 1996. — V.13 — P. 265-274.

104. Carneiro O. S. Recent developments in automatic die design for profile extrusion / O. S. Carneiro, J. M. Nobrega // Plastics Rubber and Composites. — 2004. — N 33. — P.400-408.

105. Kostic M. M. Design of Extrusion Dies / M. M. Kostic, L. G. Reifschneider // Encyclopedia of Chemical Processing. — 2006. — P. 633-649.

106. Polyflow (application software) [Електронний ресурс] // Fluent Inc.: Lebanon, NH. — 2005 — Режим доступа до ресурсу: <http://www.fluent.com/software/polyflow>.

107. Reifschneider L.G. Computational Design of a U-Profile Die and Calibrator / L. G. Reifschneider, M. K. Kostic, S. R. Vaddiraju // ANTEC. — 2004. — P. 246-250.

108. Kovalenko K. G. Design of an Extrusion Die for Plastic Profiles / K. G. Kovalenko, V. I. Sivetskii, A. L. Sokol'skii et al. // Chemical and Petroleum Engineering. — January 2014. — Vol. 49, Issue 9. — P. 675-678. DOI: 10.1007/s10556-014-9817-x. (Входить до наукометричних баз Scopus, Chemical Abstracts).

109. Kovalenko K. G. Modeling Polymer Melt Flow at the Outlet from an Extruder Molding Tool / K. G. Kovalenko, A. E. Kolosov, V. I. Sivetskii et al. // Chemical and Petroleum Engineering. — March 2014. — Vol. 49, Issue 11. — P. 792-797. DOI: 10.1007/s10556-014-9837-6. (Входить до наукометричних баз Scopus, Chemical Abstracts).

110. Коваленко Г. М. Моделювання процесу екструзії у формуючому інструменті при формуванні куткового профілю / Г. М. Коваленко, К. Г. Коваленко // Східно-Європейський журнал передових технологій. — 2011. — № 4/7 (52). — С. 9-11.

111. Сахаров О. С. Змішування розплавів термопластів у коаксіальному зазорі / О. С. Сахаров, В. І. Сівецький, К. Г. Коваленко та ін. // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження — 2012. — № 1 (9). — С. 57-59.

112. Коваленко К. Г. Дослідження процесу екструзії при формуванні куткових профілів з жорсткого ПВХ / К. Г. Коваленко, Г. М. Коваленко // Східно-Європейський журнал передових технологій. — 2012. — № 1/8 (55). — С. 11-13.

113. Акимов О. О. Дослідження процесу формування погонажних виробів з жорсткого ПВХ на екструзійній лінії ЛП-45 / О. О. Акимов, Г. М. Коваленко, К. Г. Коваленко // Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія : Технічні науки. — 2012. — № 1 (55). — С. 35-39.

114. Сокольський О. Л. Дослідження ефекту розбухання при екструзійному формуванні полімерних профілів / О. Л. Сокольський, М. А. Романченко,

- К. Г. Коваленко // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Нові рішення в сучасних технологіях. – 2013. – № 26 (999). – С. 84-88.
115. Коваленко К. Г. Особливості течії в'язкопружної рідини в дисковому зазорі екструдера / К. Г. Коваленко, В. І. Сівецький, О. Л. Сокольський // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. – 2013. – № 1 (11). – С. 16-19..
 116. Коваленко К. Г. Методика розв'язання зворотної задачі екструзійного формування термопластів / К. Г. Коваленко, В. І. Сівецький, О. Л. Сокольський та ін. // Обработка материалов давлением: Сборник научных трудов. – 2013. – № 4 (37). – С. 177-183.
 117. Коваленко К. Г. Проектирование экструзионного формующего инструмента для пластикового профиля с помощью программы AnsysPolyflow / К. Г. Коваленко, В. И. Сивецкий, А. Л. Сокольский // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2013. – № 10. – С. 25-27..
 118. Коваленко К. Г. Моделирование процесса течения расплава полимера при выходе из формующего инструмента экструдера / К. Г. Коваленко, А. Е. Колосов, В. И. Сивецкий и др. // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2013. – № 12. – С. 15-19..
 119. Кушнир М. С. Моделирование процесса плавления полимеров в каналах червячных экструдеров / М. С. Кушнир, В. И. Сивецкий, К. Г. Коваленко и др. // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2013. – № 11. – С. 29-33..
 120. Патент на корисну модель № 81464 України, МПК (2009) G01N11/14. Спосіб визначення коефіцієнта динамічної в'язкості пристінного шару розплавів термопластичних полімерів з урахуванням коефіцієнта пристінного тертя / Колосов О. Є., Сівецький В. І., Коваленко К. Г. та ін. – u№ 201302110; заявл. 20.02.2013; опубл. 25.06.2013, Бюл. № 12. – 4 с..
 121. Патент на корисну модель № 81465 України, МПК (2009) G01N11/14. Спосіб визначення коефіцієнта тертя ковзання для пари «термопластичний полімер – сталь» у залежності від температури / Колосов О. Є., Сівецький В. І., Коваленко К. Г. та ін. – u№ 201302111; заявл. 20.02.2013; опубл. 25.06.2013, Бюл. № 12. – 4 с..
 122. Патент на корисну модель № 81466 України, МПК (2009) G01N11/14. Спосіб визначення ефективного гідралічного радіуса при течії розплавів полімерів у каналах довільного перетину / Колосов О. Є., Сівецький В. І., Коваленко К. Г. та ін. – u№ 201302112; заявл. 20.02.2013; опубл. 25.06.2013, Бюл. № 12. – 5 с..
 123. Патент на корисну модель № 81467 України, МПК (2009) G01N11/14. Спосіб визначення реологічних параметрів течії розплавів термопластичних полімерів в каналах довільної геометрії / Колосов О. Є., Сівецький В. І., Коваленко К. Г. та ін. – u№ 201302113; заявл. 20.02.2013; опубл. 25.06.2013, Бюл. № 12. – 7 с..
 124. Патент на корисну модель № 81468 України, МПК (2009) G01N11/14. Спосіб приведення кривих течії розплавів термопластичних полімерів, неінваріантних відносно гідралічного радіуса каналу, до інваріантного виду / Колосов О. Є., Сівецький В. І., Коваленко К. Г. та ін. – u№ 201302114; заявл. 20.02.2013; опубл. 25.06.2013, Бюл. № 12. – 7 с..
 125. Патент на корисну модель № 82157 України, МПК B29C 47/14. Головка екструзійна / Сівецький В. І., Рослов О. В., Коваленко К. Г. та ін. – u№ 201300518; заявл. 15.01.2013; опубл. 25.07.2013, Бюл. № 14. – 4 с.
 126. Патент на корисну модель № 82205 України, МПК B29C 47/14. Головка екструзійна / Сівецький В. І., Рослов О. В., Коваленко К. Г. та ін. – u№ 201300518; заявл. 15.01.2013; опубл. 25.07.2013, Бюл. № 14. – 3 с.
 127. Акимов О. О. Дослідження процесу формування погонажних виробів з жорсткого ПВХ на екструзійній лінії ЛП-45 / О. О. Акимов, Г. М. Коваленко, К. Г. Коваленко // І Міжнар. наук.-практ. конф.: Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем: Мат. конф. – Чернігів, 2011. – С. 110-111.
 128. Коваленко К. Г. Використання в'язкопружних моделей при розрахунках екструзії полімерних матеріалів / К. Г. Коваленко, В. І. Сівецький, О. Л. Сокольський та ін. // Наук.-практ. конф.: Ресурсоенергоєфективні процеси, технології та обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів: Зб.доп. – К.: Січка, 2012. – С. 28-29.
 129. Коваленко К. Г. Моделювання течії розплаву полімеру на виході з формуючого інструмента екструдера / К. Г. Коваленко, В. І. Сівецький, О. Л. Сокольський // Наук.-практ. конф.: Ресурсоенергоєфективні процеси, технології та обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів: Зб.доп. – К.: Січка, 2013. – С. 51-52.
 130. Коваленко К. Г. Проектування екструзійного формуючого інструменту для погонажного профілю за допомогою програми ANSYS Polyflow / К. Г. Коваленко, В. І. Сівецький, О. Л. Сокольський // XIV міждун. науч.-техн. конф.: Технология и инженерное образование: Тези доп. – Севастополь, 2013. – С. 58-60.
 131. Коваленко К. Г. Оптимізація конструкції формуючих каналів екструзійних головок для виробництва погонажних профільних виробів / К. Г. Коваленко, В. І. Сівецький // Всеукр. наук. конф. молодих учених та студ.: Сучасні технології одержання композиційних матеріалів, хімічних волокон і нанокompозитів: Тези доп. – Київ, 2013. – С. 38.
 132. Сивецкий В. И., Колосова Е. П., Кривошеев В. С., Сокольский А. Л., Коваленко К. Г., Кушнир М. С. Технология формования изделий из полимерных композиционных материалов с применением интенсифицирующих методов. – Свидетельство о депонировании произведения в БД РАО «Копирус» (г. Москва) № 014-003246 от 10.04.2014г. ISBN 978-5-4472-3199-6.
 133. Сивецкий В. И., Колосова Е. П., Кривошеев В. С., Сокольский А. Л., Коваленко К. Г., Кушнир М. С. Моделирование технологических процессов и оборудования для формования изделий из полимерных композиционных материалов. – Свидетельство о депонировании произведения в БД РАО «Копирус» (г. Москва) № 014-003247 от 10.04.2014г. ISBN 978-5-4472-3200-9.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень, символів і скорочень	6
Вступ.....	7
1 Стан проблеми моделювання процесу екструзії з урахуванням в'язкопружних ефектів	9
1.1 Дослідження в'язкопружних властивостей течії розплавів термопластів та розбухання екструдату при його витіканні з формуючих каналів устаткування для виробництва профільних погонажних виробів	9
1.2 Течія і розбухання розплавів полімерів через канали складної форми..	16
1.3 Числові дослідження течії неньютонівських рідин	20
1.3.1 Аналіз та обґрунтування моделі в'язкопружної поведінки розплавів полімерів	21
1.4 Висновки	25
2 Математичне та числове моделювання процесів формування виробів екструзійним методом.....	27
2.1 Математична модель процесу екструзійного формування профільних погонажних виробів.....	27
2.2 Експериментальне дослідження параметрів реологічної моделі.....	30
2.3 Апробація результатів числового моделювання і експериментального випробування в промислових умовах.....	38
2.4 Математична модель оберненого проектування каналу профільної погонажної головки	41
3 Моделювання та числовий алгоритм проектування каналів формуючого інструменту	43
3.1 Числовий експеримент для дослідження параметрів течії розплаву полімерів у формуючих каналах профільних погонажних головок.....	43
3.1.1 Течія через кільцевий циліндричний канал (труба).....	43
3.1.2 Течія через формуючий канал круглого поперечного перерізу.....	48
3.1.3 Течія через формуючий канал прямокутного поперечного перерізу....	54
3.1.4 Моделювання течії розплаву через канал для формування порожнистого профілю квадратного поперечного перерізу	59
3.2 Числовий експеримент процесу формування профільних погонажних виробів	66
3.3 Моделювання і числовий алгоритм оберненого проектування формуючого каналу профільних головок	80
3.3.1 Моделювання і числовий алгоритм оберненого проектування "L-подібного" однокамерного порожнистого профілю	84
3.4 Висновки	90
4 Апробація результатів числового моделювання формуючих каналів екструзійних головок в промислових умовах.....	92
Перелік посилань.....	97

Наукове видання

Коваленко Ксенія Геннадіївна
Сокольський Олександр Леонідович
Сівецький Володимир Іванович

ЕКСТРУЗІЙНЕ ФОРМУВАННЯ ПОЛІМЕРНИХ ПОГОНАЖНИХ ВИРОБІВ З УРАХУВАННЯМ В'ЯЗКОПРУЖНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ

Монографія

*В авторській редакції
Надруковано з оригінал-макета замовника*